



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA
CON APLICACIONES PARA ACS Y CALEFACCIÓN
EN UN BLOQUE DE VIVIENDAS UBICADO EN
PONTEVEDRA**

PROYECTO FIN DE CARRERA
ÁREA DE INGENIERÍA TÉRMICA

Autor: EDUARDO MARTÍNEZ FONTÚRBEL

Tutor: PEDRO ACISCLO RODRÍGUEZ AUMENTE

JULIO 2009

ÍNDICE:

0	AGRADECIMIENTOS	5
1.	PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	
1.1	INTRODUCCIÓN	6
1.2	DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN A ESTUDIAR	7
1.3	CONTRIBUCIÓN SOLAR MÍNIMA DE ACS	9
1.4	DATOS CLIMÁTICOS.....	11
2.	EL COLECTOR SOLAR PLANO	
2.1	INTRODUCCIÓN	13
2.2	PROBLEMAS ASOCIADOS A LA CURVA DE NORMALIZACIÓN	14
2.3	APLICACIÓN DIRECTA AL ESTUDIO DE LA INSTALACIÓN DE PONTEVEDRA	16
2.4	MÉTODO DE CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS.	17
2.5	DATOS DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	21
2.6	COMPONENTES DEL COLECTOR.....	22
2.7	CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS	22
2.8	RESULTADOS DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR	25
2.9	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	27
3.	DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR PARA ACS	
3.1	INTRODUCCIÓN	29
3.2	CÁLCULO DE LA DEMANDA SOLAR DE ACS Y DE LA FRACCIÓN SOLAR EXIGIDA.....	29
3.3	ENERGÍA SOLAR APROVECHABLE	30
3.4	COMPONENTES PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN	32
3.5	MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR PARA ACS.....	33
3.5.1	BALANCE ENERGÉTICO EN LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN	33
3.5.2	CRITERIOS GENERALES DE CÁLCULO	36
3.5.3	RESOLUCIÓN MEDIANTE EL MÉTODO F-CHART	37
3.5.3.1	RESULTADOS DE TEMPERATURA	41
3.5.4	RESOLUCIÓN MEDIANTE MÉTODOS ITERATIVOS	42
3.5.5	CONCLUSIONES	47

3.6	ESQUEMA PRINCIPAL DE LA INSTALACIÓN DE ACS, COMPONENTES PRINCIPALES Y FUNCIONAMIENTO	48
3.7	SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE ACS	70

4. DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR PARA ACS Y CALEFACCIÓN

4.1	INTRODUCCIÓN	72
4.2	CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS DEL EDIFICIO	72
4.2.1	CONDICIONES EXTERIORES DE TEMPERATURA	73
4.2.2	LOCALES CALEFACTADOS	73
4.2.3	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS	74
4.2.4	CARGA TÉRMICA DE TRANSMISIÓN	74
4.2.4.1	RESULTADOS	76
4.2.5	CARGA TÉRMICA DE VENTILACIÓN	77
4.2.6	CARGA TÉRMICA POR INFILTRACIONES	78
4.2.7	CARGAS TÉRMICAS INTERNAS	78
4.2.8	RESUMEN DE LOS RESULTADOS	79
4.3	INSTALACIÓN PARA CALEFACCIÓN	81
4.3.1	DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE	81
4.3.1.1	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	82
4.3.1.2	DISEÑO DE LOS CIRCUITOS	82
4.3.1.3	CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	84
4.3.1.4	CÁLCULO DE LAS TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN	86
4.3.1.5	CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA Y SELECCIÓN DE LAS BOMBAS DE CIRCULACIÓN	86
4.3.2	CÁLCULO DEL ÁREA DE COLECTORES NECESARIA PARA SUPLIR LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN	88
4.4	ACOPLAMIENTO DE LA INSTALACIÓN DE CALEFACCIÓN AL SISTEMA SOLAR	90
4.4.1	ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN PARA CALEFACCIÓN	91
4.5	ESQUEMA GENERAL DE LA INSTALACIÓN DE ACS + CALEFACCIÓN	92

5. INSTALACIÓN PARA CLIMATIZACIÓN

5.1	INTRODUCCIÓN	95
5.2	SOLUCIONES ALTERNATIVAS AL FRÍO SOLAR MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES	95
5.2.1	INTRODUCCIÓN	95

5.2.2	<i>FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE LA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA</i>	97
5.2.3	<i>ACOMPLAMIENTO SISTEMA SOLAR CON LA BOMBA DE CALOR</i>	98
5.2.4	<i>SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA</i>	98
5.3	<i>REALIZACIÓN DEL PROYECTO DE UNA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA.....</i>	99
5.3.1	<i>CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA</i>	100
5.3.2	<i>COP DEL SISTEMA</i>	100
6	PRESUPUESTO DE LA INSTALACIÓN.....	107
7	ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL.....	111
8	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	113
9	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	115
10	ANEXOS: HOJAS DE CÁLCULO APLICADAS.....	116
11	CATÁLOGOS TÉCNICOS.....	119

0 AGRADECIMIENTOS

Aprovechando este último trabajo que realizo para la universidad me gustaría dejar constancia de la gran gratitud que siento hacia algunas de las personas que han pasado por mi vida a lo largo de estos años. Esta es una carrera que a veces te hace pasar por momentos duros y el sentirse arropado es la mayor de las motivaciones para seguir hacia delante.

Quiero dar las gracias especialmente a mis padres y hermana por su apoyo y comprensión. A todos los amigos que he hecho durante estos años. A mis amigos de siempre de Pontevedra (Ángela, Sebas, María, Codi, Alber). A la gente de natación.

Me gustaría destacar a los amigos que me han acompañado este año, siempre existe un lado bueno y ese lado habéis sido vosotros; Vilo, Pedro, Mel, Andrea, Nina, Raquel, Espe, Nerea. De corazón, gracias.

A Pedro y Vanesa, en el título debería haber un hueco para poner vuestro nombre, os corresponde un buen trozo a cada uno. Sois las dos personas con las que he compartido más prácticas, clases, exámenes, dudas, cafés, buenos y malos momentos, en definitiva, estos años universitarios siempre estarán ligados a vuestros nombres. Echaré de menos todas esas cosas. Gracias por estos años imborrables.

1.1 INTRODUCCIÓN

La realización de este proyecto viene motivada por la necesidad actual de generar un cambio en los hábitos de consumo energéticos y en la búsqueda de nuevas fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles que permitan obtener energía “limpia”.

El problema del cambio climático es una realidad, y por ello los gobiernos de la mayoría de los países desarrollados han decidido apostar fuertemente por las energías renovables como fuente de suministro energético. Así en España se han desarrollado planes de acción para conseguir que aumente la producción de energía con fuentes renovables y conjuntamente lograr una reducción de las emisiones contaminantes a la atmósfera.

Centrándonos en el sector residencial, la demanda energética de Agua Caliente Sanitaria (ACS) y calefacción representan aproximadamente un 25% del consumo de energía primaria. Con *El Plan de Fomento de las Energías Renovables (2000-2010)* España ha querido impulsar una mayor utilización de la energía solar térmica, principalmente en la producción de ACS.

Actualmente en España se obliga a que toda vivienda de nueva construcción tenga una determinada contribución solar para la producción de ACS, y en normas con el *CTE* (Código Técnico en la Edificación) y el *RITE* (Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios) se recogen todos los aspectos que hay que considerar a la hora de realizar este tipo de instalaciones.

Para apoyar la implantación de estas tecnologías el gobierno propone un plan de ayudas económicas, encontrándose en el *PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS DE INSTALACIONES DE BAJA TEMPERATURA* los requisitos que debe cumplir toda instalación para poder optar a dichas ayudas.

Por tanto, la finalidad de este proyecto consiste en el diseño de una instalación solar térmica basada en las normativas existentes, para dar servicio de ACS y calefacción en un bloque de viviendas de nueva construcción. El dimensionamiento de la instalación solar se realizará conforme a la exigencia actual regida por el CTE la cual obliga a instalar una determinada superficie de paneles solares para cubrir parte de la demanda total de ACS. Pese a ello, el diseño del resto de componentes de toda la instalación se realizará de manera que se pueda dar apoyo solar para calefacción cuando la demanda de ACS así lo permita, consiguiendo esto instalando un intercambiador de calor para calefacción conectado con el depósito de acumulación solar. El motivo de dimensionar el área de colectores sólo para ACS se debe principalmente a no desperdiciar energía en los meses de verano en los cuales no existe demanda de calefacción, de modo que no haya que emplear en la medida de lo posible dispositivos disipadores de energía. La opción de emplear climatización se descarta para este proyecto por no ser la carga térmica suficiente para plantearnos un sistema de climatización solar.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN A ESTUDIAR

La edificación a estudiar consiste en cuatro bloques de viviendas formados por siete chalets cada bloque, haciendo un total de veintiocho chalets. Cada bloque de viviendas está separado del que tiene a continuación por una calle y una carretera de un carril, lo que hizo plantearnos la cuestión de si dar servicio a cada bloque de forma independiente, es decir, cuatro instalaciones independientes, o plantear una solución común produciendo la energía en un único lugar y distribuyéndola a todos los bloques.

Esta segunda opción se basa en crear una red de calor que estaría constituida principalmente por:

- Una central térmica exterior en donde estaría la sala de calderas,
- La red de tuberías de distribución para dar servicio a cada bloque de viviendas mediante una subestación que conectase la red de distribución general con la red de distribución propia de cada bloque de viviendas,
- Una subestación en cada bloque de viviendas que consiste en un intercambiador de calor.
- La instalación solar de cada bloque de viviendas, con su respectivos componentes (paneles solares, intercambiador, tanque de almacenamiento, etc)
- La instalación interior propia de cada vivienda.

Esta solución conlleva un gran coste principalmente por la construcción de la red general de distribución, y sólo sería viable económicamente si hubiese un mayor número de viviendas a las que dar servicio para así poder amortizarla.

La principal ventaja que se obtendría si se realizase la red de calor para obtener una distribución centralizada es la de obtener un rendimiento más elevado en la producción de calor, ya que toda la demanda se cubriría con una sola caldera.

Por todo ello, la solución que se ha escogido es la de diseñar la instalación solar de forma independiente para cada bloque. Al ser obra del mismo constructor las características constructivas son iguales para cada bloque, pudiendo realizar el proyecto para un solo bloque y aplicarlo exactamente igual al resto.

A continuación se muestran las vistas exteriores del bloque A, el cual será objeto de este proyecto.



Figura 1.1: Vistas del bloque de viviendas

La distribución de las áreas de cada vivienda se muestra en la tabla 3.1

BLOQUE A (1 a 13)					
	Planta	Sup. Util	Sup. Cons.	Total Util	Total Cons.
TIPO A 1	Semisotano	56.88	72.00	56.88	72.00
	Baja	59.19	83.75	59.19	83.75
	Primera	61.16	78.99	61.16	78.99
	Bajocubierta	28.58	30.70	28.58	30.70
	Total	203.81	265.44	203.81	265.44
TIPO B 3-5-11	Semisotano	58.94	72.00	176.82	216.00
	Baja	61.13	83.65	183.39	250.95
	Primera	63.31	78.99	189.93	236.97
	Bajocubierta	45.53	50.74	136.59	152.22
	Total	228.91	285.38	686.73	856.14
TIPO C 7-9	Semisotano	58.94	72.00	117.88	144.00
	Baja	61.13	83.65	122.26	167.30
	Primera	63.31	78.99	126.62	157.98
	Bajocubierta	54.60	60.18	109.20	120.36
	Total	237.98	294.82	475.96	589.64
TIPO D 13	Semisotano	56.88	72.00	56.88	72.00
	Baja	59.44	84.29	59.44	84.29
	Primera	61.16	78.99	61.16	78.99
	Bajocubierta	25.88	30.70	25.88	30.70
	Total	203.34	265.98	203.34	265.98
TOTAL PLANTA SEMISOTANO				408.46	504.00
TOTAL PLANTA BAJA				424.28	586.29
TOTAL PLANTA PRIMERA				438.87	552.93
TOTAL PLANTA BAJOCUBIERTA				298.23	333.98
TOTAL BLOQUE A (1 a 13)				1569.84	1977.20

Tabla 3.1: Distribución de las áreas en cada vivienda

Como se aprecia en la tabla adjunta, cada vivienda está formada por cuatro pisos: semisótano, bajo, primero y bajocubierta. Los únicos pisos que se van a acondicionar para dar servicio de calefacción son la planta baja formada por salón, cocina, cuartos de baño, hall de recepción y la planta primera formada por las habitaciones y los cuartos de baño.

La sala de calderas estará situada en una zona reservada para ello situada junto al semisótano de las viviendas.

Además de estos pisos también hay que tener en cuenta la parte del tejado, ya que allí es donde se instalarán los colectores solares. Al tratarse de un tejado inclinado se tendrán que emplear colectores que puedan integrarse directamente, asumiendo por ello que se habrá una pérdida en la eficiencia del colector al no estar en su inclinación óptima. La superficie disponible también es un factor que hay que tener en cuenta, aunque para este proyecto no es un parámetro crítico por dimensionar el área de colectores sólo para ACS.

1.3 CONTRIBUCIÓN SOLAR MÍNIMA DE ACS

La contribución solar que hay que aportar a la producción de ACS vendrá definida según la zona climática en donde se encuentre el edificio y la demanda prevista de ACS aplicando los criterios de consumo dentro del CTE en la sección 4 del *Documento Básico HE Ahorro de Energía*.

En la figura 1.2 se muestra el mapa de España con las distintas zonas climáticas delimitadas.



Figura 1.2: Mapa de zonas climáticas. Fuente CTE

La ciudad de Pontevedra, lugar donde se encuentra el bloque de viviendas, pertenece a la zona climática I.

Para el cálculo de la demanda de ACS se aplican ratios que son función del tipo de vivienda y del número de habitaciones. Aunque son sólo estimaciones que se realizan, a falta de datos mejores se aplicarán dichos ratios para realizar los cálculos.

Número de dormitorios	1	2	3	4	5	6	7	más de 7
Número de Personas	1,5	3	4	6	7	8	9	Nº de dormitorios

Tabla 1.2: Criterio habitabilidad de una vivienda según el número de dormitorios. Fuente CTE

Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60° C	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel ****	70	por cama
Hotel ***	55	por cama
Hotel/Hostal **	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	por cama
Residencia (ancianos, estudiantes, etc)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábricas y talleres	15	por persona
Administrativos	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
Lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

Tabla 1.3: Criterio de consumo de ACS por persona según el tipo de vivienda. Fuente CTE

Mediante las tablas 1.2 y 1.3 se puede realizar una estimación de la demanda total de ACS que tendrá el bloque de viviendas al día:

$$C_{ACS} = 30 \cdot 6 \cdot 7 = 1260 \text{ l/día}$$

Una vez conocida la zona climática y el consumo diario de ACS se puede determinar la contribución solar mínima que los paneles solares deben aportar al año que será según la tabla 1.4 de un 30% de la demanda total.

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-5.000	30	30	50	60	70
5.000-6.000	30	30	55	65	70
6.000-7.000	30	35	61	70	70
7.000-8.000	30	45	63	70	70
8.000-9.000	30	52	65	70	70
9.000-10.000	30	55	70	70	70
10.000-12.500	30	65	70	70	70
12.500-15.000	30	70	70	70	70
15.000-17.500	35	70	70	70	70
17.500-20.000	45	70	70	70	70
> 20.000	52	70	70	70	70

Tabla 1.4: Contribución solar mínima según la zona climática. Fuente CTE

1.4 DATOS CLIMÁTICOS

Para el desarrollo de los cálculos de dimensionamiento del área de colectores es necesario conocer datos de radiación incidente, temperatura ambiente, temperatura del agua de red. Todas estas variables se encuentran publicadas en el PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS DE INSTALACIONES DE BAJA TEMPERATURA, en forma de medias mensuales a partir de registros históricos empleando la fuente CENSOLAR.

En la tabla 1.5 se muestran los valores correspondientes a la ciudad de Pontevedra:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tamb (°C)	11	12	14	16	18	20	22	23	20	17	14	12
Tred (°C)	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
I (MJ/m2)	5,5	8,2	13	15,7	17,5	20,4	22	18,9	15,1	11,3	6,8	5,5

Tabla 1.5: Datos de Temperatura ambiente, Temperatura de agua de red y Energía incidente por metro cuadrado en una superficie horizontal. Fuente CENSOLAR

A partir de los datos de temperatura de la red y del consumo diario de ACS según los criterios anteriormente expuestos, se calcula la energía térmica de ACS necesaria para elevar la temperatura del agua de la red hasta la temperatura de suministro (60°C).

Decir que se ha aplicado un coeficiente corrector en función del mes del año. Esto es debido a que el consumo de ACS es menor en los meses de verano por dos motivos principales, uno es que baja el nivel de ocupación de las viviendas por vacaciones y el otro es que la temperatura a la que se demanda el ACS es menor que en invierno, reduciendo con ello la cantidad de agua a 60°C que debe suministrarse por emplear mayor cantidad de agua fría para la mezcla.

Meses	Cp (J/KgK)	N (días/mes)	Consumo ACS (l/día)	Tsum (°C)	Tred (°C)	Q (ACS) [KJ]
Enero	4187	31	1638	60	8	11055589,27
Febrero	4187	28	1638	60	9	9793660,968
Marzo	4187	31	1386	60	11	8815033,458
Abril	4187	30	1260	60	13	7438624,2
Mayo	4187	31	1260	60	14	7523034,12
Junio	4187	30	882	60	15	4985460,9
Julio	4187	31	630	60	16	3597972,84
Agosto	4187	31	630	60	15	3679744,95
Septiembre	4187	30	1260	60	14	7280355,6
Octubre	4187	31	1260	60	13	7686578,34
Noviembre	4187	30	1638	60	11	10081709,82
Diciembre	4187	31	1638	60	8	11055589,27

Tabla 1.6: Carga térmica de ACS mensual.

2.1 INTRODUCCIÓN

El colector solar plano es el elemento fundamental del sistema de energía solar que transforma la energía solar radiante en energía térmica de forma directa por transferencia de calor al fluido de trabajo.

Los componentes esenciales de un colector solar son:

- Cubierta
- Placa absorbente
- Tuberías o conductos por donde circula el fluido
- Carcasa o caja del colector
- Fluido térmico

El funcionamiento del colector solar viene determinado por la curva de normalización, la cual se obtiene por ensayo en banco de pruebas bajo condiciones estables de: radiación solar, velocidad del viento, temperaturas del fluido a la entrada y de ambiente durante un periodo de tiempo en el que la temperatura de salida del fluido y la energía útil extraída no varían sensiblemente.

La ecuación resultante que se obtiene es la siguiente:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_e - T_a}{RI}$$

Ecuación obtenida según la ecuación de Bliss resultado de realizar un balance de energía en el colector.

- U_L : Coeficiente global de pérdidas [$W/m^2\text{°C}$]
- RI : Radiación incidente total sobre el captador por unidad de superficie
- F_R : Factor de eficacia de intercambio de calor entre la placa y el fluido de trabajo, representa la relación entre la energía captada y la que captaría si la temperatura de la placa fuese la misma que la del fluido a la entrada del captador
- $F_R(\tau\alpha)$: Es la ordenada en el origen y representa el rendimiento óptico del colector, función de la transmitancia de la cubierta y de la absorptancia de la placa.
- T_e : Temperatura del fluido de trabajo a la entrada del colector
- T_a : Temperatura ambiente.

2.2 PROBLEMAS ASOCIADOS A LA CURVA DE NORMALIZACIÓN

A la hora de dimensionar el campo de colectores de una instalación la normativa recomienda métodos de cálculos que emplean la curva de normalización para predecir el comportamiento del colector una vez esté en funcionamiento. Para predecir con la mayor exactitud posible el comportamiento que tendrá el panel solar es importante adaptar en la medida de lo posible las condiciones climatológicas a las que se expondrá el panel solar una vez sea instalado, para de esta manera poder estimar con la mayor precisión posible las pérdidas de calor que se producen en este.

Los colectores solares se ensayan según dos normativas existentes, en USA la ASHRAE 93 y en Europa la EN 12975-2. En la normativa europea se contabiliza el efecto del viento en cierta medida, pues según datos oficiales sólo el 38% de los ensayos se realiza con situación de viento. Además de la presencia de viento es igualmente necesario tener en cuenta la dirección de este, aspecto que no se está teniendo en cuenta en las aproximaciones que se realizan en la actualidad. Además de este aspecto también se deben contemplar las pérdidas de rendimiento por efecto del envejecimiento del panel y del ensuciamiento.

A partir de medidas experimentales realizadas en la instalación solar de la UC3M en donde se han ido registrando medidas instantáneas cada 2 segundos de tiempo (midiéndose temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador, del cristal, de la caja, de la placa absorbadora, radiación solar, humedad relativa ambiente, velocidad y dirección del viento) se realiza una modelización de las pérdidas que tienen lugar en cada componente del colector, comprobando que la recta de normalización resultante tiene rendimientos menores que la curva empleada en los catálogos oficiales de los colectores.

Los resultados de estos análisis se aplican al estudio de la instalación solar de Pontevedra, de forma que se pretende dimensionar el campo de colectores con mayor precisión que empleando directamente la recta de normalización del colector. Posteriormente se calcularán los resultados obtenidos mediante la aplicación directa de estos cálculos con los que se recomiendan en el PLIEGO DE CONDICIONES TÉRMICAS PARA INSTALACIONES DE B.T en donde la instalación solar se dimensiona mediante técnicas que emplean la curva de normalización.

En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos del cálculo del rendimiento en la instalación solar de la UC3M.

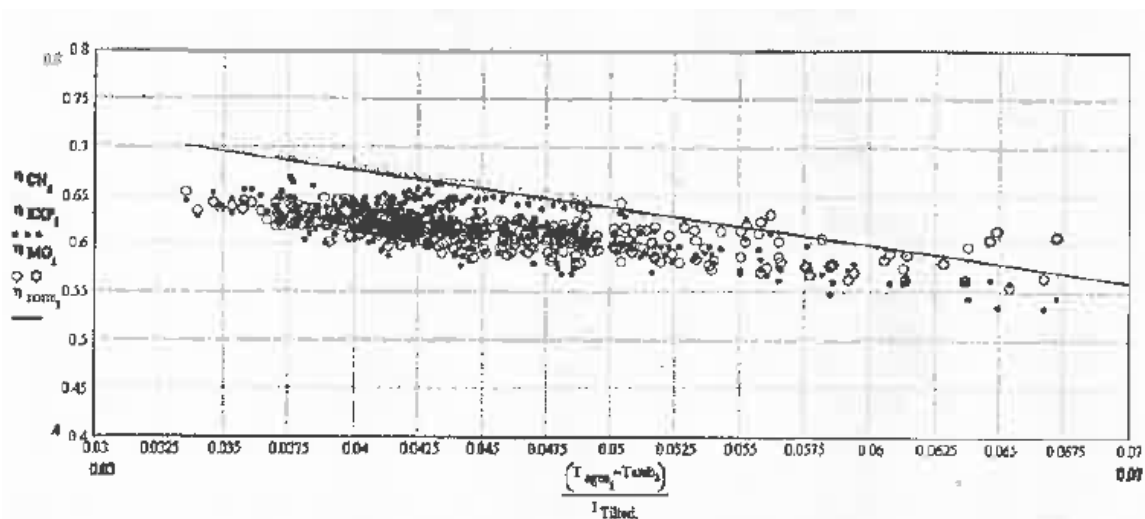


Figura 2.1: Rendimiento del colector real frente al rendimiento del colector modelo. Fuente: Artículo publicado por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la UC3M. Autor Rodríguez M.C

La baja calidad de la imagen no permite distinguir con exactitud los resultados obtenidos. En la figura 1.2 se representa el rendimiento del colector frente a $\frac{T_{eco}-T_{amb}}{RI}$, siendo T_{eco} la temperatura de entrada del fluido al colector y RI la radiación incidente. La línea recta representa el rendimiento del colector solar teórico dado por la curva de normalización. Los puntos negros representan el rendimiento real que se ha podido medir directamente en la instalación solar de la UC3M y los puntos blancos representan el rendimiento del colector del modelo obtenido experimentalmente.

Como se puede observar en la figura 2.1, los valores obtenidos mediante el modelo experimental se ajustan mucho mejor a los reales que la curva de normalización.

Como conclusión cabe decir que los resultados que aquí se muestran se aplicarán directamente al cálculo del área de colectores de la instalación solar de Pontevedra empleando para ello las expresiones experimentales obtenidas en dicho estudio, pretendiendo de este modo cuantificar las pérdidas de calor de una forma más precisa y real que mediante la aplicación de la curva de normalización. Posteriormente se compararán los resultados obtenidos mediante el método experimental de la UC3M con el método recomendado por el IDAE.

La forma de aplicar los resultados experimentales a este proyecto será mediante un análisis de las pérdidas de calor en el colector solar. La metodología que se seguirá se explica con detalle en puntos más avanzados del documento dedicados al cálculo del área de colectores.

2.3 APLICACIÓN DIRECTA AL ESTUDIO DE LA INSTALACIÓN DE PONTEVEDRA

Antes de mostrar los resultados y el procedimiento de cálculo cabe destacar que extrapolar los resultados de la instalación de la UC3M al presente proyecto tiene un gran inconveniente, el de tener que estimar las pérdidas de calor con temperaturas medias mensuales, pues esto implica que los resultados que se obtengan serán sólo aproximados, ya que para contabilizar las pérdidas por transferencia de calor de una forma eficiente y que se ajuste a la realidad sería conveniente emplear temperaturas horarias para poder dar un resultado más preciso. Como esto no es posible y sería muy laborioso realizar cualquier diseño de una instalación solar con datos horarios, se emplearán datos climatológicos mensuales asumiendo por ello que las pérdidas de calor no estarán del todo bien modelizadas, aún así se estarán valorando de una forma más eficiente que si se emplease directamente la curva de normalización.

La forma más eficiente de aplicar los resultados experimentales obtenidos a una instalación nueva a diseñar, sería obteniendo una recta de normalización corregida a partir de la dada por el constructor del panel, para que así si se tuviesen en cuenta los efectos que contribuyen a la disminución del rendimiento del panel solar. Modificando directamente la recta de normalización sería más fácil aplicar métodos de resolución que manejasen temperaturas medias mensuales.

El estudio de las pérdidas de calor se realiza sobre un solo colector, definiéndose para ello las partes de las que se compone, los materiales que lo conforman y las dimensiones de estos.

- Cabe destacar que para realizar el cálculo de algunas resistencias térmicas se requiere emplear datos de temperaturas de algunos componentes del colector como la cubierta, la placa absorbedora o la caja, temperaturas que a priori son desconocidas. La forma de resolver este problema es realizar una estimación previa de las temperaturas de estos componentes y posteriormente aplicar métodos iterativos con las temperaturas halladas en el capítulo correspondiente al dimensionado de la instalación solar para ACS recalculando nuevamente las resistencias térmicas y las pérdidas de calor.

A continuación se muestra el circuito de resistencias térmicas extraído del artículo *TRANSFERENCIA DE CALOR EN COLECTORES SOLARES PLANOS, CONSIDERANDO VELOCIDAD Y VELOCIDAD DEL VIENTO*, en el que se representan todas las resistencias térmicas del colector y se han dibujado los caminos que sigue la radiación incidente, transformándose en calor útil para calentar el fluido térmico y en pérdidas térmicas por transferencia de calor desde la placa hacia el exterior, distinguiendo las que se van por la parte superior y por la parte inferior del colector.

Además hay que matizar dos puntos, el primero es que se han despreciado las pérdidas de calor que afectan a las partes laterales del colector, por considerarlas despreciables frente al resto, y el segundo punto es que en los cálculos se ha calculado las pérdidas por la parte inferior del colector teniendo en cuenta la resistencia térmica de convección exterior, la cual

realmente va a ser prácticamente despreciable porque los paneles instalados carecerán de soporte ya que irán integrados en el tejado.

$$I_T \cdot A = Q_{\text{útil}} + Q_{p_down} + Q_{p_up}$$

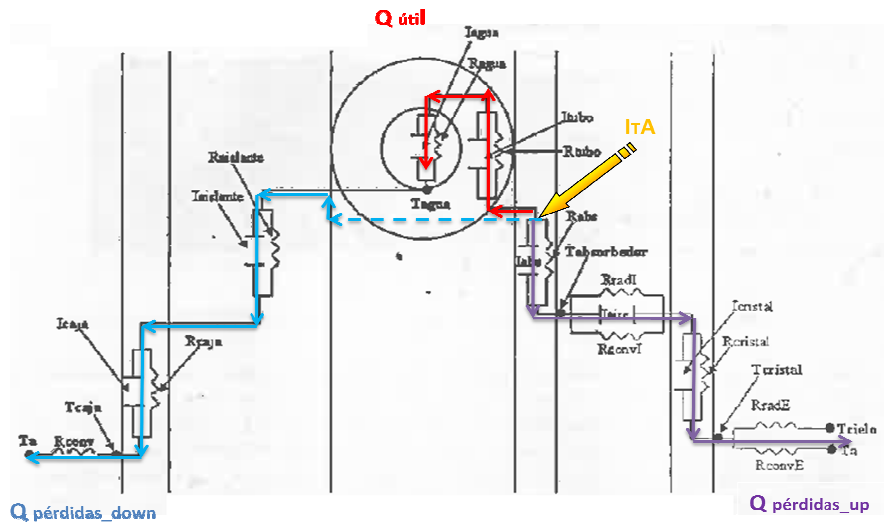


Figura 2.2: Esquema de resistencias térmicas del colector y flujos de las pérdidas de calor.
Fuente: Artículo publicado por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la UC3M.

2.4 MÉTODO DE CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS.

A continuación se muestran los pasos seguidos para el cálculo de todas las resistencias térmicas del colector solar para así resolver los circuitos de pérdidas de calor mostrados en el esquema general.

Según el mecanismo de transferencia de calor habrá resistencias térmicas de conducción, convección y radiación.

Todas las correlaciones experimentales que se emplean en estas expresiones han sido obtenidas de:

Fuente: Artículo publicado por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la UC3M.

- CONDUCCIÓN:

$$R_{cond} = \frac{e}{kA} \left[\frac{K}{W} \right] \quad R_{cond_tubo} = \frac{\ln \left(\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right)}{2\pi LK} \left[\frac{K}{W} \right]$$

$R_{cond_placa} = 0,012 \left[\frac{K}{W} \right]$ Valor experimental obtenido mediante un balance de energía en la placa.

En donde:

- e : Espesor del material en metros
- k : Conductividad térmica del material en $\left[\frac{W}{mK} \right]$
- D_{EXT} : Diámetro exterior de la tubería por donde circula el fluido
- D_{INT} : Diámetro interior de la tubería por donde circula el fluido
- L : Longitud de la tubería dentro del panel solar

• CONVECCIÓN:

Las resistencias térmicas debidas a los procesos de convección se calculan aplicando las expresiones experimentales de la referencia (1).

➤ Convección exterior: Parte superior del colector

❖ *Resistencia de convección exterior por efecto del viento*

$$Nu_{PF} = 0,105 Re_{PF}^{0,646} Pr^{1/3} \quad Nu_{PF} = \frac{h_e L_c}{K_{aire}} \quad R_{conv_E} = \frac{1}{h_e A} \left[\frac{K}{W} \right]$$

Correlación experimental empleada para la situación de flujo de viento paralelo a la tubería por la que circula el fluido caliente del campo de colectores determinando la constante y el exponente del Reynolds a partir de las medidas de temperatura recogidas en la instalación solar de la UC3M.

En donde:

- Re_{PF} : Número de Reynolds del aire exterior, en donde la longitud característica será la longitud total de las N filas en serie que tenga el campo de colectores, en este caso cinco filas.
 - Datos para el cálculo del Reynolds:
 - Pr : Número de Prandtl del aire (adimensional)
 - A : Área de la cubierta de vidrio
 - L_c : Longitud característica

	Densidad (kg/m3)	L_c (m)	ϕ (Ns/m2)	K (W/m°C)
Aire exterior	1,1614	4,925	1,85E-05	2,63E-02

Tabla 2.1: Propiedades térmicas del aire exterior para el cálculo del Reynolds

❖ *Resistencia de convección libre en el interior del colector.*

Fenómeno de transferencia de calor por convección libre entre la placa absorbidora y la caja del colector debido al calentamiento del aire por la radiación solar.

Se resuelve aplicando hipótesis de flujo en una cavidad rectangular inclinada cuya correlación empírica responde a la ecuación que sigue:

$$Nu_l = 4,328 \cdot 10^{-10} Ra_l^2 - 1,478 \cdot 10^{-6} Ra_l + 1,001$$

En donde:

Ra_l : Número de Rayleigh, definido por la siguiente expresión,

$$Ra_l = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad \beta = \frac{1}{T_{placa} + T_{caja}}$$

Siendo:

α (m ² /s)	ν (m ² /s)	g (m/s ²)	L (m) [s entre placas]
1,59E-05	2,25E-05	9,81	0,075

La expresión de la resistencia de convección libre es la siguiente:

$$R_{conv_l} = \frac{1}{h_l A} \left[\frac{K}{W} \right]$$

❖ *Resistencia de convección interior del fluido de trabajo.*

Para el fluido interior se emplea la ecuación de Dittus-Boelter por tratarse de un fluido en un conducto cilíndrico.

$$Nu_D = 0,023 Re_{agua}^{4/5} \cdot Pr_{agua}^{0,4} \quad Re_{agua} = \frac{\rho U D_{int}}{\mu} \quad Pr_{agua} = 5,288$$

$$R_{conv_agua} = \frac{1}{h_{agua} A} \left[\frac{K}{W} \right]$$

Siendo:

- A : Área de transferencia del tubo, ($A = \pi i \cdot D_{int} \cdot L_{tubo}$)

➤ Convección exterior: Parte posterior del colector

El efecto del viento en la parte inferior del colector solar es mucho menor porque el efecto del viento no es tan influyente en la cara posterior como en la superior. Las expresiones a emplear se han obtenido de igual forma que antes de resultados experimentales a partir de las ecuaciones sacadas de las referencia (1).

$$Nu_{PF} = 8,948 Re_{PF}^{0,385} Pr^{1/3} \quad Nu_{PF} = \frac{h_e L_c}{K_{aire}} \quad R_{conv_E} = \frac{1}{h_e A} \left[\frac{K}{W} \right]$$

• RADIACIÓN:

El fenómeno de radiación se produce en dos partes del colector, por una parte se produce el fenómeno de radiación exterior debido a la incidencia del Sol en la cubierta de vidrio que absorbe la radiación comprendida entre las longitudes de onda de 0,3 y 3 μm . A su vez también se produce una radiación en el interior del colector entre la placa absorbente y el vidrio.

Las expresiones empleadas para el cálculo de las resistencias térmicas de radiación se han obtenido directamente de los resultados experimentales del estudio realizado en la universidad UC3M y publicados en el artículo de la referencia (1).

➤ Radiación exterior:

$$R_{rad_E} = \frac{1}{\epsilon_{cristal} \sigma A (T_{cristal}^2 + T_{cielo}^2) (T_{placa} + T_{cristal_bajo})} \left[\frac{K}{W} \right]$$

Siendo:

$\epsilon_{cristal}$	$\epsilon_{IRcristal}$	$\epsilon_{IRplaca}$	$\sigma [W/m^2K^4]$	$A (m^2)$
0,90	0,10	0,10	5,67E-08	1,87

➤ Radiación interior:

$$R_{rad_I} = \frac{\epsilon_{IRcristal} + \epsilon_{IRplaca} - \epsilon_{IRcristal} \epsilon_{IRplaca}}{\epsilon_{IRcristal} \epsilon_{IRplaca} \sigma A (T_{cristal_bajo}^2 + T_{placa}^2) (T_{placa} + T_{cristal_bajo})} \left[\frac{K}{W} \right]$$

Un aspecto a tener en cuenta en el cálculo de las resistencias térmicas de convección natural y radiación es su dependencia con las temperaturas de algunos elementos del colector como son la placa absorbedora o la cubierta. En una primera aproximación se estimaron dichas temperaturas para poder calcular las resistencias térmicas. Una vez calculadas las pérdidas que tienen lugar en el colector, a partir de un balance de energía en el colector solar (en los anexos de hojas de cálculo se muestra el sistema de ecuaciones necesario para calcular las pérdidas) y mediante el empleo de las resistencias térmicas es posible calcular todas las temperaturas de los componentes del colector.

2.5 DATOS DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO

Para el cálculo de las resistencias térmicas de convección exterior es necesario conocer la velocidad y dirección del viento. A partir de los datos proporcionados por la estación meteorológica del aeropuerto de Vigo (Fuente: Meteogalicia) se han obtenido los valores que se muestran en la siguiente tabla.

En las columnas se representa la velocidad del viento medida a las 00:00 horas, a las 07:00 horas, a las 13:00 horas y a las 18:00 horas.

	Velocidad del Viento (m/s)				
	VEL_00	VEL_07	VEL_13	VEL_18	V_media
ENERO	2,05	2,82	2,81	1,70	2,35
FEBRERO	1,65	2,21	2,72	2,10	2,17
MARZO	1,42	2,13	2,53	2,99	2,27
ABRIL	2,43	2,97	3,93	3,86	3,30
MAYO	1,92	2,01	3,73	3,68	2,83
JUNIO	2,31	2,35	4,08	4,25	3,25
JULIO	1,87	2,06	4,08	4,01	3,01
AGOSTO	1,95	1,98	4,43	4,09	3,11
SEPTIEMBRE	1,44	1,75	3,91	3,09	2,55
OCTUBRE	1,86	1,95	2,63	2,52	2,24
NOVIEMBRE	2,27	2,78	4,02	3,00	3,02
DICIEMBRE	3,83	3,32	4,17	3,49	3,70

Tabla 2.2: Datos de las velocidades del viento en el aeropuerto de Vigo.

La dirección predominante es la oeste, aunque cabe decir que las condiciones de dirección del viento son muy cambiantes en la estación donde fueron tomadas dichas medidas.

La dirección del flujo del viento respecto del colector se considera paralela (colectores orientados hacia el sur) ya que la dirección del viento es paralela a la circulación del fluido de trabajo.

2.6 COMPONENTES DEL COLECTOR

Componentes del colector	Material	Áreas (m ²)	K (W/m ² °C)	Espesor (m)
Cubierta vidrio	Vidrio templado	1,868	0,9	0,003
Placa absorbente	Aluminio	1,896	237	0,0006
Tuberías	Cobre		401	
Fluido interior			0,613	
Aislante Térmico	Polieuretano	1,868	0,027	0,03
Caja del colector	Acero galvanizado	4,182	45	0,0003

Tabla 2.3: Resumen de las propiedades geométricas y físicas de los componentes del colector.

2.7 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS

Para el cálculo de las resistencias térmicas se emplearán las ecuaciones de transferencia de calor de conducción, convección y radiación según el elemento estudiado.

A continuación se muestran los resultados obtenidos y un resumen de las cargas térmicas:

CONDUCCIÓN

Componentes del colector	Material	Áreas (m ²)	K (W/m ² °C)	Espesor (m)	Rt Cond (K/W)
Cubierta vidrio	Vidrio templado	1,868	0,9	0,003	0,00178
Placa absorbente	Aluminio	1,896	237	0,0006	0,012
Tuberías	Cobre		401		0,00002
Aislante Térmico	Polieuretano	1,868	0,027	0,03	0,594
Caja del colector	Acero galvanizado	4,182	45	0,0003	1,59E-06

Tabla 2.4: Resultados de las resistencias térmicas de conducción.

CONVECCIÓN Fluido caloportador (interior)

Material	Áreas (m2)	Re	Pr	Nusselt	h (W/k*m2)	Rt Conv (K/W)
Agua (fluido interior)	0,305	5,829	7954,963	61,44	1448,63	0,002262

Tabla 2.5: Resultados de las resistencias térmicas de convección.

		CONVECCIÓN					
		Áreas (m2)	Pr	Re	Nusselt	h (W/k*m2)	Rconv_E1 (K/W)
Aire Exterior (superior)	ENERO	1,87	0,707	1018407,3	1163,8	4,44	0,1206
	FEBRERO	1,87	0,707	941135,4	1106,0	4,22	0,1269
	MARZO	1,87	0,707	983423,8	1137,9	4,34	0,1233
	ABRIL	1,87	0,707	1429916,4	1449,1	5,53	0,0968
	MAYO	1,87	0,707	1229279,8	1314,3	5,01	0,1068
	JUNIO	1,87	0,707	1408829,1	1435,3	5,47	0,0978
	JULIO	1,87	0,707	1304397,0	1365,6	5,21	0,1028
	AGOSTO	1,87	0,707	1350750,1	1396,8	5,33	0,1005
	SEPTIEMBRE	1,87	0,707	1105574,4	1227,3	4,68	0,1144
	OCTUBRE	1,87	0,707	971762,7	1129,1	4,31	0,1243
	NOVIEMBRE	1,87	0,707	1308413,6	1368,3	5,22	0,1026
	DICIEMBRE	1,87	0,707	1605351,9	1561,6	5,96	0,0899

Tabla 2.6: Resultados de las resistencias térmicas de convección en la parte superior del colector

Los resultados de resistencias térmicas que se muestran en las Tablas 2.7 y 2.8 son debidas a la convección exterior entre la superficie expuesta al viento del colector. Se han analizado únicamente la cara posterior y la cara inferior, despreciándose los laterales por considerar sus pérdidas despreciables frente al resto.

		CONVECCIÓN					
		Áreas (m2)	Pr	Re	Nusselt	h (W/k*m2)	Rconv_E2 (K/W)
Aire Exterior (posterior)	ENERO	1,87	0,707	1018407,3	1638,9	6,25	0,0856
	FEBRERO	1,87	0,707	941135,4	1589,8	6,06	0,0883
	MARZO	1,87	0,707	983423,8	1617,0	6,17	0,0868
	ABRIL	1,87	0,707	1429916,4	1867,6	7,12	0,0751
	MAYO	1,87	0,707	1229279,8	1762,0	6,72	0,0797
	JUNIO	1,87	0,707	1408829,1	1857,0	7,08	0,0756
	JULIO	1,87	0,707	1304397,0	1802,7	6,88	0,0779
	AGOSTO	1,87	0,707	1350750,1	1827,1	6,97	0,0768
	SEPTIEMBRE	1,87	0,707	1105574,4	1691,5	6,45	0,0830
	OCTUBRE	1,87	0,707	971762,7	1609,5	6,14	0,0872
	NOVIEMBRE	1,87	0,707	1308413,6	1804,8	6,88	0,0778
	DICIEMBRE	1,87	0,707	1605351,9	1952,7	7,45	0,0719

Tabla 2.8: Resultados de las resistencias térmicas de convección en la parte inferior del colector

La *tabla 2.8* muestra los valores de las resistencias térmicas calculadas mediante la aplicación de relaciones de transferencia de calor para convección libre que se produce en el aire que está entre la placa absorbente y la caja del colector.

				CONVECCIÓN LIBRE				
				Ra_l	Nusselt	h (W/k*m2)	Rconv_l (K/W)	
Aire Interior	Tplaca	Tinfinito [°C]	Beta [1/K]					
	ENERO	18,63	12,63	0,00173	1,20E+05	7,09	2,49	0,2154
	FEBRERO	27,80	20,60	0,00168	1,40E+05	9,30	3,26	0,1641
	MARZO	32,33	22,83	0,00166	1,83E+05	15,21	5,33	0,1003
	ABRIL	39,32	30,62	0,00162	1,64E+05	12,33	4,32	0,1238
	MAYO	50,24	40,69	0,00157	1,74E+05	13,78	4,83	0,1108
	JUNIO	60,87	49,32	0,00152	2,04E+05	18,67	6,55	0,0818
	JULIO	65,13	52,13	0,00151	2,27E+05	22,95	8,05	0,0665
	AGOSTO	55,39	42,39	0,00155	2,34E+05	24,30	8,52	0,0628
	SEPTIEMBRE	39,20	27,80	0,00163	2,15E+05	20,74	7,27	0,0736
	OCTUBRE	37,32	27,47	0,00164	1,87E+05	15,81	5,54	0,0966
	NOVIEMBRE	24,28	17,98	0,00170	1,24E+05	7,47	2,62	0,2044
DICIEMBRE	20,10	11,10	0,00173	1,80E+05	14,83	5,20	0,1029	

Tabla 2.8: Resultados de las resistencias térmicas de convección que tiene lugar en el interior del colector.

RADIACIÓN						
	Tcristal (cubierta)	Tcristal_baj (cubierta)	Tplaca	Tcielo	R_radE [K/W]	R_radI [K/W]
Enero	13,17	11,17	18,63	14,90	0,111	1,860
Febrero	17,39	15,39	27,80	16,61	0,108	1,736
Marzo	17,56	15,56	32,33	18,56	0,106	1,695
Abril	23,16	21,16	39,32	20,66	0,102	1,591
Mayo	34,64	32,64	50,24	24,21	0,095	1,428
Junio	48,29	46,29	60,87	27,36	0,087	1,275
Julio	49,86	47,86	65,13	28,72	0,086	1,242
Agosto	39,74	37,74	55,39	29,68	0,090	1,361
Septiembre	23,19	21,19	39,20	26,85	0,099	1,592
Octubre	22,66	20,66	37,32	21,34	0,102	1,611
Noviembre	16,60	14,60	24,28	18,76	0,107	1,775
Diciembre	13,42	11,42	20,10	15,68	0,110	1,843

Tabla 2.9: Resultados de las resistencias térmicas de radiación exterior y radiación interior.

2.8 RESULTADOS DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR

Una vez se han calculado todos los valores de las resistencias térmicas se puede proceder al cálculo de las pérdidas de calor que tienen lugar por la parte posterior e inferior del colector solar.

Hay que destacar que en los meses más fríos Enero, Noviembre y Diciembre, las pérdidas de calor resultantes mediante la aplicación de estos métodos salen menores de lo esperado, y ha sido imposible ajustar las temperaturas para cumplir la ecuación del balance de energía en los colectores ($I_T A = Q_{\text{útil}} + Q_{p_up} + Q_{p_down}$) posiblemente debido a que al trabajar con temperaturas medias se están despreciando los momentos en los que existen mayores pérdidas sobre todo de radiación. Para el resto de meses si se han conseguido ajustar las temperaturas a partir de las pérdidas de manera adecuada.

La forma de obtener las pérdidas consiste simplemente en resolver los circuitos equivalentes de resistencias térmicas.

En la figura 2.3 se muestran los dos circuitos que han de resolverse para calcular el valor de las pérdidas de calor y posteriormente las tablas con los resultados resumidos mes a mes.

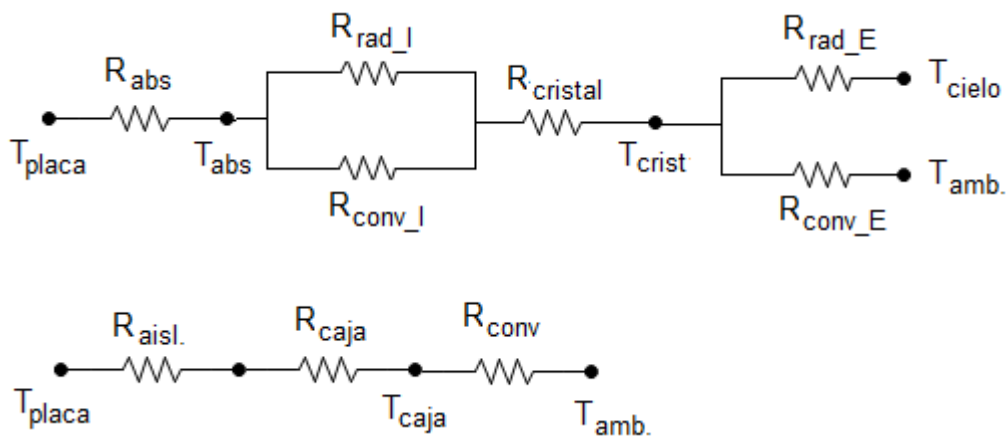


Figura 2.3: Esquema de los flujos de pérdidas de calor que tienen lugar por la parte superior e inferior.

Los resultados que se han obtenido de resolver todas las resistencias térmicas son los siguientes:

	CIRCUITO TÉRMICO DE PÉRDIDAS POR LA PARTE POSTERIOR (DOWN)													
	Tagua salida	Tcaja	Tamb	Rplaca_abs	Raislante	Rcaja	Rconv_E2	Requiv [K/W]				Qp_down [W]		
Enero	16,230	12,630	11,701	0,012	0,5948	1,5943E-06	0,0856	0,6925				50,0		
Febrero	25,522	20,602	12,973				0,0883	0,6831				108,5		
Marzo	28,880	22,830	14,789				0,0868	0,6816				128,7		
Abril	35,685	30,625	16,992				0,0751	0,6700				166,7		
Mayo	48,244	40,694	19,041				0,0797	0,6745				231,3		
Junio	58,268	49,318	21,705				0,0756	0,6704				292,1		
Julio	62,445	52,125	23,402				0,0779	0,6727				310,1		
Agosto	52,691	42,391	24,097				0,0768	0,6716				233,0		
Septiembre	35,502	27,802	21,380				0,0830	0,6778				131,5		
Octubre	34,319	27,469	18,004				0,0872	0,6820				141,6		
Noviembre	20,275	17,975	15,119				0,0778	0,6726				68,1		
Diciembre	13,198	16,098	12,734				0,0719	0,6667				55,2		

	CIRCUITO TÉRMICO DE PÉRDIDAS POR LA PARTE SUPERIOR (UP)														
	Tplaca	Tcristal (cubierta)	Tamb	Tcielo	Rplaca_abs	Rrad_I	Rconv_I	Rconv_E1	Rrad_E	Rcristal	Requiv [K/W]		Q1p_up[W]	Q2p_up[W]	Qp_up[W]
Enero	18,63	13,17	11,70	14,90	0,0120	1,86	0,22	0,1206	0,1109	0,0018	0,2068		145,3	144,3	289,6
Febrero	27,80	17,39	12,97	16,61		1,74	0,16	0,1269	0,1075		0,1637		359,1	352,9	712,0
Marzo	32,33	17,56	14,79	18,56		1,69	0,10	0,1233	0,1064		0,1085		706,6	703,0	1409,5
Abril	39,32	23,16	16,99	20,66		1,59	0,12	0,0968	0,1023		0,1287		688,5	691,9	1380,4
Mayo	50,24	34,64	19,04	24,21		1,43	0,11	0,1068	0,0948		0,1166		833,7	815,2	1649,0
Junio	60,87	48,29	21,71	27,36		1,28	0,08	0,0978	0,0872		0,0906		998,8	965,9	1964,7
Julio	65,13	49,86	23,40	28,72		1,24	0,07	0,1028	0,0860		0,0769		1299,5	1249,4	2548,9
Agosto	55,39	39,74	24,10	29,68		1,36	0,06	0,1005	0,0900		0,0738		1233,6	1215,4	2449,0
Septiembre	39,20	23,19	21,38	26,85		1,59	0,07	0,1144	0,0991		0,0841		969,7	967,3	1937,0
Octubre	37,32	22,66	18,00	21,34		1,61	0,10	0,1243	0,1022		0,1049		744,3	736,1	1480,4
Noviembre	24,28	16,60	15,12	18,76		1,77	0,20	0,1026	0,1068		0,1971		208,7	209,2	417,9
Diciembre	20,10	13,42	12,73	15,68		1,84	0,10	0,0899	0,1103		0,1113		306,5	307,9	614,3

Tabla 2.11: Resultados de las pérdidas de calor que tienen lugar en la parte inferior y superior del colector.

Para una mejor visualización de los resultados obtenidos de las pérdidas de calor se resumen a continuación las pérdidas de calor y las resistencias térmicas equivalentes del circuito correspondiente a la parte superior del colector y del circuito correspondiente a la parte inferior del colector.

Cabe decir que las resistencias térmicas equivalentes se calculan resolviendo los circuitos que se plantean en la *figura 2.3*.

	Resistencias Equivalentes		PÉRDIDAS DE CALOR EN EL CAMPO DE COLECTORES		
	Sup. Posterior	Sup. Inferior	Qp_down [W]	Qp_up [W]	Qpc[W]
	Req[K/W]	Req[K/W]			
Ene	0,692	0,207	50,03	289,57	339,60
Feb	0,683	0,164	108,54	711,99	820,53
Mar	0,682	0,109	128,67	1409,55	1538,22
Abr	0,670	0,129	166,67	1380,45	1547,12
May	0,674	0,117	231,31	1648,95	1880,27
Jun	0,670	0,091	292,09	1964,65	2256,74
Jul	0,673	0,077	310,13	2548,89	2859,03
Ago	0,672	0,074	232,97	2449,02	2681,99
Sep	0,678	0,084	131,47	1936,98	2068,45
Oct	0,682	0,105	141,61	1480,40	1622,00
Nov	0,673	0,197	68,07	417,91	485,98
Dic	0,667	0,111	55,22	614,33	669,55

Tabla 2.12: Resumen de los resultados obtenidos de las pérdidas de calor en el campo de colectores de la instalación de Pontevedra.

2.9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO DE RESISTENCIAS TÉRMICAS CON LA CURVA DE NORMALIZACIÓN

Una vez se han calculado las pérdidas de calor que tienen lugar en el colector solar mediante la aplicación de las resistencias térmicas se comparan los resultados obtenidos con los que se obtienen directamente de la aplicación de la curva de normalización.

A continuación se muestran los resultados obtenidos al aplicar la curva de normalización para resolver el sistema frente al método de las resistencias térmicas.

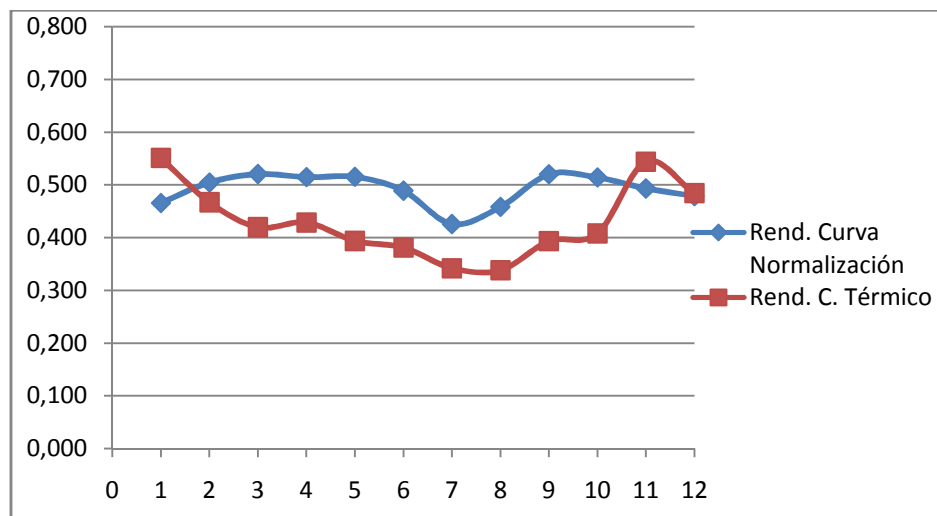


Figura 2.4: Rendimiento del colector en función del método de cálculo.

	Curva de Normalización			Circuitos térmicos		
	Tsco	Teco	η colector	Tsco	Teco	η colector
Ene	17,03	14,92	0,466	16,23	14,06	0,551
Feb	22,26	19,41	0,505	25,52	21,49	0,467
Mar	33,79	29,47	0,521	28,88	25,00	0,419
Abr	39,46	34,98	0,515	35,68	31,27	0,428
May	41,63	36,94	0,515	48,24	41,58	0,394
Jun	54,86	49,79	0,489	58,27	51,88	0,381
Jul	66,79	61,93	0,426	62,45	57,25	0,342
Ago	65,65	60,80	0,458	52,69	48,47	0,338
Sep	43,38	38,19	0,520	35,50	31,15	0,393
Oct	37,20	32,93	0,514	34,32	30,00	0,408
Nov	23,69	20,73	0,493	20,28	17,83	0,544
Dic	18,03	15,58	0,479	13,20	11,77	0,484

Tabla 2.13: Resultado de las temperaturas alcanzadas en el campo de 5 colectores y de los rendimientos obtenidos en función del método de cálculo.

Como se puede apreciar tanto en la figura 2.4 como en los valores de la tabla 2.13, el rendimiento alcanzado mediante la aplicación de resistencias térmicas en general es menor que el que se obtendría al aplicar la curva de normalización. Como ya se ha explicado en el *punto 2.8* en los meses más fríos (Enero, Noviembre y Diciembre) los resultados no son los esperados, lo cual posiblemente es debido a una mala estimación de las temperaturas de los componentes del panel solar, ya que al trabajar con temperaturas medias se pueden estar despreciando los momentos en donde se producen mayores pérdidas por alcanzarse en el colector temperaturas mayores de las estimadas.

En el resto de meses los resultados se ajustan a lo esperado aunque la diferencia existente entre los rendimientos es posiblemente más elevada de lo real. Esto puede ser debido a la dificultad de realizar una estimación fina de las temperaturas en los componentes del colector para poder aplicar con una garantía mayor las expresiones de las resistencias térmicas las cuales dependen de dichas temperaturas, por no contar con datos horarios de temperaturas para poder realizar estimaciones más precisas.

Los circuitos térmicos se han resuelto a partir de estimaciones de todas las temperaturas de los componentes del colector conocidas las temperaturas de entrada y salida del colector a partir de la resolución de un sistema de ecuaciones (capítulo 3).

CAPÍTULO 3: DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR PARA ACS

3.1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de utilizar ACS durante todo el año hace que la inversión en el sistema solar se rentabilice de una forma relativamente rápida. Los cálculos que se han de realizar se basarán en el cumplimiento de la normativa que rige actualmente el CTE, el cual exige que un determinado tanto por ciento de la demanda de ACS en nuevas viviendas sea aportado por energía solar u otra fuente de carácter renovable.

No es objeto de este proyecto cargarlo de normativa ni documentación que se encuentra publicada en organismos públicos por lo que simplemente se citan los puntos clave para el dimensionamiento de una instalación de ACS, y se harán referencias a ellos cuando proceda sin profundizar en exceso.

Actualmente los documentos oficiales sobre la contribución solar disponen los siguientes puntos:

IT 1.2.4.6.1 Contribución solar para la producción de agua caliente sanitaria:

1. En los edificios nuevos o sometidos a reforma, con previsión de demanda de agua caliente sanitaria una parte de las necesidades energéticas térmicas derivadas de esa demanda se cubrirá mediante la incorporación en los mismos de sistemas de captación, almacenamiento y utilización de energía solar, adecuada a la radiación global de su emplazamiento y a la demanda total de agua caliente del edificio.

2. Las instalaciones térmicas destinadas a la producción de agua caliente sanitaria cumplirán con la exigencia fijada en la sección HE 4 “Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria” del Código Técnico de la Edificación, que les afecten.

En función de la ubicación de las viviendas el aporte solar mínimo exigido varía, tal y como se ha definido en el capítulo 1 del presente documento, la contribución solar mínima para ACS que se exige es del 30%. Este valor habrá que contrarrestarlo con lo exigido por el boletín oficial del municipio donde se encuentra ubicada la instalación ya que en caso de ser más restrictivo que lo impuesto en el CTE (referencia (2)) debe emplearse dicho valor.

3.2 CÁLCULO DE LA DEMANDA SOLAR DE ACS Y DE LA FRACCIÓN SOLAR EXIGIDA

En primer lugar debe calcularse la demanda estimada de ACS en la vivienda, para lo cual se emplea la normativa que está basada en datos estadísticos que son función del número de habitaciones de la vivienda, número de personas, número de aparatos sanitarios de consumo...

La necesidad de ACS debe estimarse a partir de:

- Cálculo de la necesidad máxima horaria (hora punta)
- Cálculo de la necesidad diaria.

Mediante el cálculo de la necesidad máxima horaria se dimensionará la caldera de apoyo para poder dar la potencia necesaria cuando las condiciones sean de máxima demanda. La demanda diaria estimada se empleará como base de cálculo para el dimensionamiento de los paneles solares.

Este cálculo ya se ha realizado en el capítulo 1 del presente documento, con lo cual simplemente se resumen los resultados que se obtuvieron.

La demanda de ACS total de un bloque de viviendas será el siguiente:

Número de viviendas por bloque: 7
Número de habitaciones por vivienda: 4
Número de personas por vivienda: 6

$$Demanda_{ACS} = 7 \cdot 4 \cdot 6 = 1260 \text{ l/día}$$

Para la demanda de ACS estimada el aporte solar mínimo exigido es de un 30%.

3.3 ENERGÍA SOLAR APROVECHABLE

Para la realización de un correcto dimensionamiento del campo de paneles es necesario conocer cuanta radiación solar incidente es aprovechable para calentar el fluido de trabajo que circula por los paneles. Los datos de radiación incidente empleados se han obtenido de la referencia (3). Los datos de radiación que se muestran en el *Capítulo 1* hacen referencia a la radiación incidente sobre metro cuadrado en una superficie horizontal, por lo tanto habrá que aplicarle un coeficiente de corrección que será función de la inclinación de los paneles y de la latitud de la ubicación de la instalación.

Los principales factores que influyen sobre la captación de energía del panel son:

- **Inclinación y orientación del colector**

Para captar de forma eficiente la radiación directa solar es preciso que los rayos incidan de manera lo más perpendicular posible a estos. La inclinación será función de la latitud del lugar donde se realiza el proyecto.



Para el cálculo de las pérdidas que tendrá la instalación se aplica la siguiente ecuación:

$$\phi_{\text{Pontevedra}} := 42.4 \quad \beta := 30 \quad \beta_{\text{opt}} := 42.4 \quad \alpha := 0$$

$$\text{Pérdidas} := 100 \left[1.2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{\text{opt}})^2 + 3.5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2 \right] = 1.845$$

En donde:

- β es la inclinación del tejado
- β_{OPT} es la inclinación óptima que debería tener el panel para funcionamiento óptimo.
- α es el ángulo de inclinación del panel con respecto al sur. Supondremos que el bloque de viviendas que se analiza está perfectamente orientado al sur.

Debido a la inclinación de 30° del colector se producen pérdidas del 1,8% de la radiación incidente por efecto de no tener una inclinación óptima. Valor que está dentro de los límites que impone la normativa correspondiente (referencia (4))

- **Pérdidas por sombras**

Las sombras pueden ser debidas a la disposición de los colectores o por la proximidad de un edificio. En este caso particular no habrá pérdidas por el efecto de las sombras, ya que los colectores están integrados en el tejado y no habrá edificios cercanos.

- **Factor de corrección de la energía incidente**

Para tener en cuenta la pérdida de radiación debido a la inclinación del panel solar se define un factor de corrección de la radiación incidente. Este factor varía en función de la latitud de la ciudad donde se realiza la instalación y de la inclinación de los paneles solares respecto a la horizontal.

En la tabla 3.1 con los valores de radiación incidente sobre los paneles con una inclinación de 30° .

RADIACIÓN INCIDENTE		
K1	Gdm (MJ/m2)	R1 (KJ/m2)
1,36	5,5	7480
1,28	8,2	10496
1,19	13	15470
1,09	15,7	17113
1,02	17,5	17850
1	20,4	20400
1,02	22	22440
1,1	18,9	20790
1,23	15,1	18573
1,37	11,3	15481
1,46	6,8	9928
1,44	5,5	7920

Tabla 3.1: Radiación solar incidente corregida sobre m2 de panel solar con una inclinación de 30º

3.4 COMPONENTES PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN

Una instalación solar térmica está constituida por una serie de elementos destinados a la captación de la radiación solar, transformarla en energía térmica calentando para ello un fluido térmico (agua o agua-glicolada) directamente y almacenar la energía para atender la demanda del usuario final.

Los componentes básicos de una instalación de ACS son los siguientes:

- Sistema de captación de la radiación solar formado por un campo de colectores por los que circula el fluido de trabajo que se calentará directamente por la acción del Sol.
- Sistema de acumulación en que se almacenará el fluido caliente. Para mejorar la eficiencia del conjunto de colectores lo más eficiente será obtener la mayor estratificación de temperaturas posible para así devolver el agua lo más fría posible. Para aumentar dicha estratificación se suelen poner varios tanques en serie, el número es función de la demanda diaria de ACS.
- Circuito hidráulico de tuberías, bombas, válvulas, etc.
- Intercambiadores que permitan el intercambio de calor entre el fluido de trabajo que circula por el campo de colectores y el fluido que circula por el almacenamiento.
- Equipo de regulación y control para el funcionamiento correcto de la instalación y evitar posibles sobrecalentamientos que puedan dañar a los colectores
- Equipo de respaldo para garantizar el suministro de ACS cuando el aporte solar no es suficiente para satisfacer la demanda total.

En los siguientes puntos se realizará el dimensionamiento de todos estos elementos y se explicará su funcionamiento particular y en conjunto.

3.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR PARA ACS

3.5.1 BALANCE ENERGÉTICO EN LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN

En primer lugar se realizarán los balances energéticos en cada componente que conforman la instalación solar con el objetivo de plantear un sistema de ecuaciones que nos permita resolver los parámetros necesarios para el dimensionamiento de la instalación y para poder calcular las temperaturas medias mensuales que alcanza cada componente para a posteriori poder evaluar las pérdidas de calor que tienen lugar en ellos. Se explicará en cada ecuación las incógnitas que se manejan.

En la figura 3.1 se muestra un esquema básico de la instalación solar para suministro de ACS, en la cual nos basaremos para realizar el sistema de ecuaciones, aunque más adelante se verá que la configuración escogida es algo diferente a la aquí mostrada.

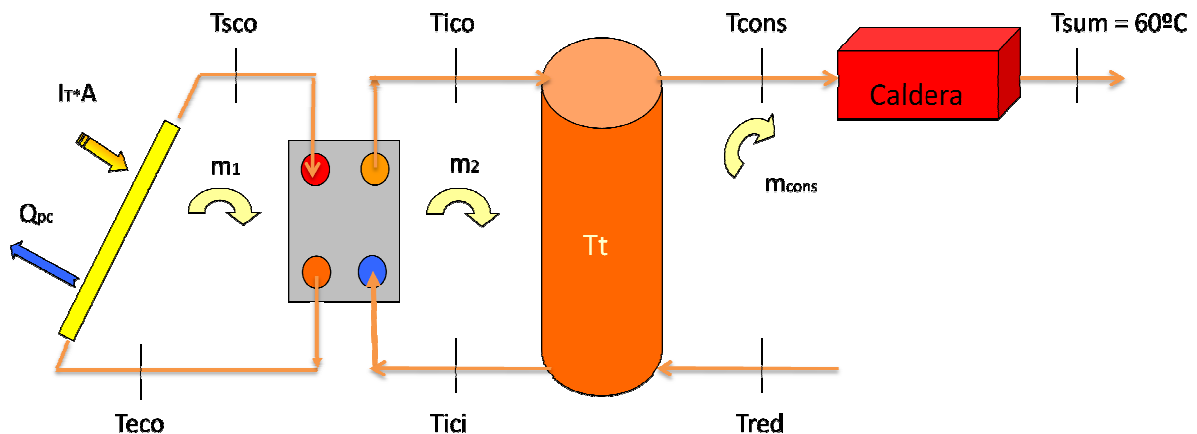
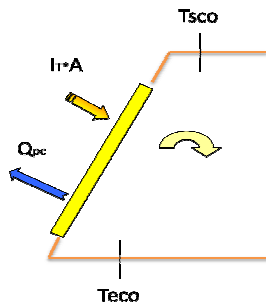


Figura 3.1: Esquema básico de la instalación solar para ACS.

A continuación se muestran los balances energéticos en cada elemento de la instalación:

1. Balance energético en el colector solar:



$$I_{\text{Tanual}} \cdot \eta_0 \cdot A_0 - Q_{pc} - [m_1 \cdot C_p \cdot (T_{sco} - T_{eco})] = 0$$

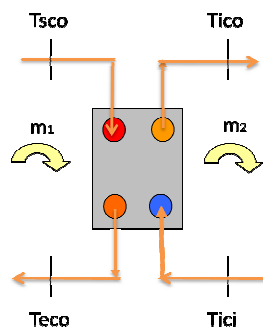
Se ha considerado un volumen de control en estado estacionario por lo que la variación temporal se ha eliminado.

De esta ecuación se desconocen el área de colectores, las pérdidas y las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo. Para el caudal del fluido se escogerá el nominal recomendado por el constructor de los paneles.

A partir de esta ecuación se obtiene el valor de las pérdidas de calor que habrá que contrarrestar con las que se obtienen aplicando las ecuaciones descritas en el Capítulo 2.

De esa comparación se obtendrá un nuevo valor de las temperaturas de entrada y salida del fluido al colector solar menores que las anteriores por estar valorando de una forma más eficiente las pérdidas de calor mediante las fórmulas del Capítulo 2.

2. Balance energético en el intercambiador solar:



$$m_1 \cdot C_p \cdot (T_{sco} - T_{eco}) = m_2 \cdot C_p \cdot (T_{ico} - T_{iico})$$

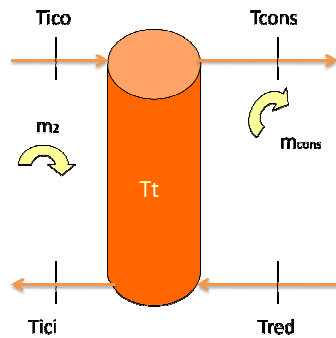
$$\frac{(T_{ico} - T_{iico})}{(T_{sco} - T_{iico})} = \epsilon_{IC}$$

A partir del balance de energía en el intercambiador de calor y de la definición de la eficiencia se obtienen las dos ecuaciones que se muestran. El intercambiador solar será de placas y simétrico, esto quiere decir que el caudal del fluido del circuito primario del intercambiador es el mismo que el caudal de circuito secundario. Las propiedades térmicas de los dos fluidos serán muy parecidas por estar a temperaturas próximas, por ello en la ecuación de la eficiencia del intercambiador se han despejado directamente los términos $C = m_1 \cdot C_{p1} = m_2 \cdot C_{p2}$

El valor de la eficiencia en este caso no será una incógnita, se estimará dándole un valor de 0,6 el cual será un requisito a la hora de dimensionarlo.

Las temperaturas serán todas incógnitas del sistema que habrá que solucionar.

3. Balance de energía en el depósito de almacenamiento solar:



$$m_2 \cdot C_p \cdot (T_{ico} - T_{ici}) = m_{cons} \cdot C_p \cdot (T_{cons} - T_{red})$$

La ecuación resultante de realizar el balance de energía en el tanque. Los datos que son conocidos en esta ecuación serán los caudales y la temperatura de la red propia de la provincia de Pontevedra.

Además de esta ecuación también se obtiene a partir del grado de estratificación del tanque las siguientes expresiones:

$$\frac{T_{cons} - T_t}{T_{ico} - T_t} = E_t \quad T_t = \frac{T_{ico} \cdot m_2 + T_{red} \cdot m_{cons}}{m_2 + m_{cons}}$$

La estratificación del tanque hace referencia a la distribución de temperaturas que tiene lugar dentro del tanque entre el agua caliente que entra en el tanque y el agua de reposición y fría que entra por la zona de abajo. De esta forma dentro del tanque se tiene un gradiente de temperaturas, cuanto mayor sea más estratificado estará el tanque y más eficiente será el sistema solar, ya que se debe enviar el fluido a los colectores lo más fría posible para aumentar su rendimiento.

El grado de estratificación es un valor que se estima en $E_T = 0,25$, a partir de registros experimentales en otras instalaciones. Este grado de estratificación se tratará de alcanzar diseñando un sistema basado en emplear dos depósitos de almacenamiento en serie. Además esta solución es la mejor para posteriormente combinar el sistema de ACS con el de calefacción como se verá en el capítulo dedicado a la instalación de calefacción.

4. Contribución solar mínima:

En esta ecuación se relaciona la energía total de ACS que se debe emplear para calentar el agua desde la temperatura de reposición de la red hasta la temperatura de suministro (60°C) frente a la energía útil que es posible extraer del sistema solar.

La expresión que se emplea es la siguiente:

$$f = \frac{Q_{\text{útil solar}}}{Q_{\text{ACS_TOTAL}}} = \frac{m_1 \cdot Cp \cdot (T_{sco} - T_{eco})}{m_{cons} \cdot Cp \cdot (T_{sum} - T_{red})} = \frac{T_{cons} - T_{red}}{T_{sum} - T_{red}}$$

El valor de la fracción solar vendrá definido por el RITE para las condiciones particulares de la vivienda y de su ubicación, en este proyecto como ya se ha visto en puntos anteriores, la fracción solar mínima exigible será del 30%.

Esta ecuación por tanto es la que nos definirá el área de colectores que debe tener la instalación para cumplir con el mínimo exigido, de forma que si al resolver el sistema se obtiene un valor menor del 30% habrá que incrementar el número de colectores hasta llegar o sobrepasar dicho valor.

3.5.2 CRITERIOS GENERALES DE CÁLCULO

El criterio general para el dimensionamiento de la instalación solar para dar la cobertura exigida por la normativa (30% de fracción solar para este estudio) debe especificar los valores medios de la demanda de energía y de la contribución solar. El método de cálculo incluirá las prestaciones globales definidas por:

- a) La demanda de energía térmica;
- b) La energía solar térmica aportada;
- c) Las fracciones solares mensuales y anual;
- d) El rendimiento medio anual;

Para el dimensionamiento del campo de colectores en el ANEXO XI del *PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS PARA INSTALACIONES DE BAJA TEMPERATURA* se recomienda emplear el método de F-CHART. Este es un método reconocido y es el que actualmente emplean la mayoría de las empresas a la hora de dimensionar el campo de colectores de una determinada instalación.

Alternativamente a dicho método también se realizará un cálculo más detallado del campo de colectores empleando balances de energía en cada componente de la instalación empleando las ecuaciones descritas anteriormente. Mediante la herramienta Mathcad se resuelve el sistema de ecuaciones planteado y una vez se obtengan todas las temperaturas de los componentes se estudiarán las pérdidas térmicas de calor que tienen lugar en los colectores solares a partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 2.

Los métodos de resolución que se están aplicando en la actualidad se basan en la curva de normalización del colector, la cual no está teniendo en cuenta efectos como la pérdida de calor por convección por efecto del viento o el ensuciamiento.

Por tanto, mediante la resolución de las ecuaciones descritas anteriormente con Mathcad y la posterior evaluación de las pérdidas de calor se obtendrá el dimensionamiento del área necesaria del campo de colectores cuyo valor será contrarrestado con el obtenido mediante la aplicación del método F-Chart.

Para realizar una mejor comparación entre los resultados obtenidos mediante F-Chart y mediante Mathcad con el posterior recálculo de las temperaturas con las ecuaciones de pérdidas de calor, se hallarán todas las temperaturas medias mensuales obtenidas en la instalación.

3.5.3 RESOLUCIÓN MEDIANTE EL MÉTODO F-CHART

Este es el método más empleado a nivel empresarial y está basado en el cálculo de la fracción solar f mediante la siguiente ecuación:

$$f = 1,029D_1 - 0,065D_2 - 0,245D_1^2 + 0,0018D_2^2 + 0,0215D_1^3$$

Toda la información sobre el cálculo de los parámetros D_1 y D_2 se encuentran disponibles en la referencia (4) en donde se muestra el procedimiento a seguir de forma detallada.

Brevemente se explica el significado de cada parámetro:

- D_1 : Expresa la relación entre la energía absorbida por la placa del captador plano y la carga calorífica total de calentamiento durante un mes.

$$D_1 = \frac{\text{Energía absorbida por el captador}}{\text{Carga calorífica mensual}}$$

- D_2 : Expresa la relación entre las pérdidas de energía del captador, para una determinada temperatura, y la carga calorífica de calentamiento durante un mes.

$$D_2 = \frac{\text{Energía perdida por el captador}}{\text{Carga calorífica mensual}}$$

Los pasos a seguir para la obtención de la fracción solar f mediante este método son:

a) Cálculo de la demanda energética necesaria para calentar el agua desde la temperatura de la red hasta la temperatura de consumo (60°C)

- Demanda de ACS:

Viviendas	personas/ vivienda	Consumo ACS [l/persona]	Consumo ACS (l/día)
7	6	30	1260

- Energía demandada de ACS mensual:

Meses	Cp (J/KgK)	N (días/mes)	Distrib. consumo	C (consumo ACS) (l/día)	Tsum (°C)	Tred (°C)	Q (ACS) [KJ]
Enero	4187	31	1,3	1638	60	8	11055589,27
Febrero	4187	28	1,3	1638	60	9	9793660,968
Marzo	4187	31	1,1	1386	60	11	8815033,458
Abril	4187	30	1	1260	60	13	7438624,2
Mayo	4187	31	1	1260	60	14	7523034,12
Junio	4187	30	0,7	882	60	15	4985460,9
Julio	4187	31	0,5	630	60	16	3597972,84
Agosto	4187	31	0,5	630	60	15	3679744,95
Septiembre	4187	30	1	1260	60	14	7280355,6
Octubre	4187	31	1	1260	60	13	7686578,34
Noviembre	4187	30	1,3	1638	60	11	10081709,82
Diciembre	4187	31	1,3	1638	60	8	11055589,27

Tabla 3.2: Energía total demandada de ACS mes a mes.

Cabe mencionar que se ha decidido emplear una distribución de consumos mensual, ya que está comprobado por datos de muchas instalaciones domésticas que el consumo de ACS en verano es bastante menor por dos razones, la demanda de agua a temperatura menor que en invierno, con lo cual se consumirá menos agua del depósito de ACS y más del agua de red. La otra razón es que el nivel de ocupación de las viviendas en verano suele descender porque la gente se va de vacaciones. Para tener esto en cuenta se ha realizado una distribución del consumo total de ACS según el mes.

b) Cálculo del parámetro D1:

Scolector (m2)	η_o	$FrN(\tau\alpha)$	N (días/mes)	R1 (KJ/m2)	Ea (KJ)	D1
9,34	0,769	0,701	31	7480	1518907,568	0,137
9,34	0,769	0,701	28	10496	1925084,990	0,197
9,34	0,769	0,701	31	15470	3141377,016	0,356
9,34	0,769	0,701	30	17113	3362911,663	0,452
9,34	0,769	0,701	31	17850	3624665,788	0,482
9,34	0,769	0,701	30	20400	4008846,954	0,804
9,34	0,769	0,701	31	22440	4556722,705	1,266
9,34	0,769	0,701	31	20790	4221669,565	1,147
9,34	0,769	0,701	30	18573	3649819,337	0,501
9,34	0,769	0,701	31	15481	3143610,704	0,409
9,34	0,769	0,701	30	9928	1950972,184	0,194
9,34	0,769	0,701	31	7920	1608255,072	0,145

c) Cálculo del parámetro D2:

Scol_Total (m2)	K2	K1	t (seg)	Tamb	F'rU (W/m2K)	Ep (J)	D2
9,34	0,853	1	2,68E+06	11,70	3,943	7,43E+09	0,672
9,34	0,881	1	2,42E+06	12,97	3,943	6,83E+09	0,697
9,34	0,937	1	2,68E+06	14,79	3,943	7,87E+09	0,893
9,34	0,996	1	2,59E+06	16,99	3,943	7,89E+09	1,061
9,34	1,011	1	2,68E+06	19,04	3,943	8,07E+09	1,073
9,34	1,026	1	2,59E+06	21,71	3,943	7,67E+09	1,538
9,34	1,043	1	2,68E+06	23,40	3,943	7,88E+09	2,189
9,34	0,976	1	2,68E+06	24,10	3,943	7,31E+09	1,985
9,34	0,978	1	2,59E+06	21,38	3,943	7,34E+09	1,008
9,34	0,980	1	2,68E+06	18,00	3,943	7,93E+09	1,031
9,34	0,937	1	2,59E+06	15,12	3,943	7,59E+09	0,753
9,34	0,837	1	2,68E+06	12,73	3,943	7,20E+09	0,651

d) Cálculo de la fracción solar:

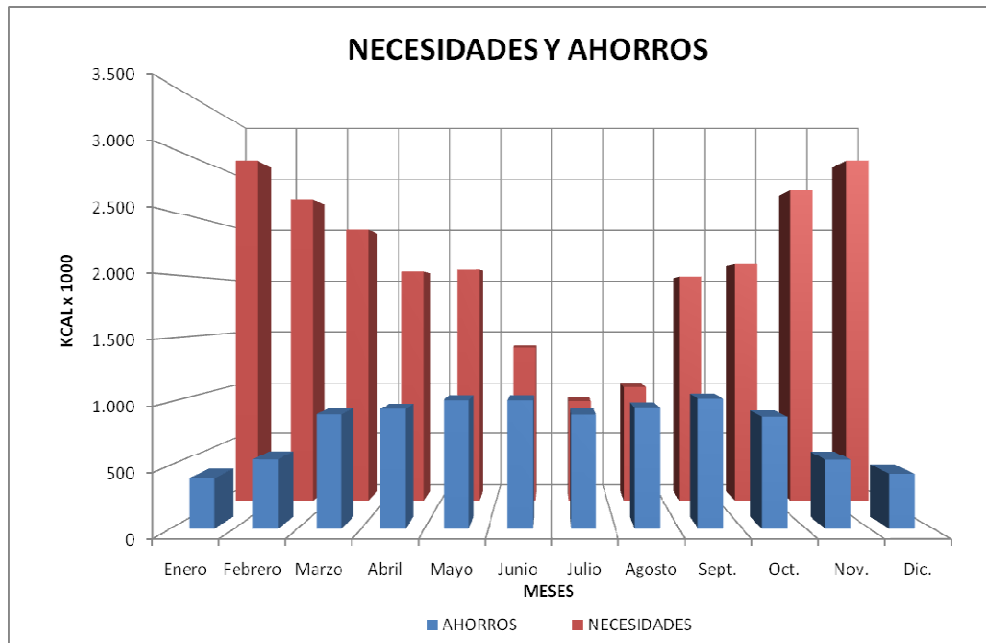
	F	Q (ACS) [KJ]	Qu (KJ)
Enero	0,1186	11055589	1311732
Febrero	0,1839	9793661	1801076
Marzo	0,3441	8815033	3033066
Abril	0,4316	7438624	3210167
Mayo	0,4604	7523034	3463463
Junio	0,7292	4985460	3635348
Julio	1,0000	3597972	3597972
Agosto	0,9751	3679744	3588109
Septiembre	0,4835	7280355	3520304
Octubre	0,3898	7686578	2996521
Noviembre	0,1770	10081709	1784617
Diciembre	0,1292	11055589	1428103
TOTAL	35,88	9,30E+07	3,34E+07

Tabla 3.3: Fracción solar obtenida mes a mes y fracción solar total

Ncolectores	5
-------------	---

El resultado que se obtiene aplicando F-Chart es de un total de 5 colectores para poder llegar a una contribución solar de al menos el 30% exigido. Con un campo de 4 colectores no se consigue llegar al mínimo. Dicho sea que la aplicación de este método suele dar un resultado fiable pero que tiende hacia el sobredimensionamiento de la superficie total de paneles, con lo cual, quizás con 4 colectores si se podría llegar a un 30% de la demanda total de ACS a 60°C.

A continuación se muestran los resultados de forma gráfica.



Gráfica 3.1: Representación gráfica de las necesidades y de la aportación solar mes a mes

3.5.3.1 RESULTADOS DE TEMPERATURA

Una vez calculada la fracción solar mensual se pueden calcular las temperaturas de los componentes resolviendo el sistema de ecuaciones planteado. Dicho sistema se encuentra descrito en el Anexo del capítulo Hojas de Cálculo.

RESULTADOS INSTALACIÓN SOLAR								
Ncolectores = 5								9,34
	Tsco [°C]	Teco [°C]	Tcons [°C]	T tanque [°C]	Tico [°C]	Tici [°C]	m1 [kg/s]	mcons [kg/s]
Enero	17,57	15,05	14,17	13,60	15,89	13,36	0,139	0,057
Febrero	23,00	19,59	18,38	17,60	20,73	17,31	0,139	0,051
Marzo	34,94	29,75	27,86	26,65	31,48	26,28	0,139	0,043
Abril	40,65	35,27	33,28	32,02	37,07	31,69	0,139	0,037
Mayo	42,87	37,26	35,18	33,86	39,13	33,51	0,139	0,037
Junio	56,24	50,15	47,81	46,36	52,18	46,09	0,139	0,026
Julio	68,13	62,29	60,00	58,59	64,24	58,40	0,139	0,018
Agosto	66,98	61,16	58,88	57,47	63,10	57,28	0,139	0,018
Septiembre	44,76	38,53	36,24	34,79	40,61	34,38	0,139	0,039
Octubre	38,34	33,21	31,32	30,12	34,92	29,79	0,139	0,039
Noviembre	24,46	20,91	19,67	18,87	22,09	18,54	0,139	0,057
Diciembre	18,66	15,72	14,72	14,06	16,70	13,77	0,139	0,061

Tabla 3.4: Parámetros de funcionamiento para 5 colectores según los resultados de F-Chart.

3.5.4 RESOLUCIÓN MEDIANTE MÉTODOS ITERATIVOS

Otra forma de resolver el sistema para el cálculo de la superficie de captación es mediante el análisis de los componentes principales que conforman la instalación solar e intervienen directamente en el proceso de captación, intercambio, almacenamiento y distribución de calor.

El método consiste en la resolución del sistema de ecuaciones que se plantea a partir de los balances de energía de los componentes de la instalación (*Anexos de Hojas de Cálculo*).

En primer lugar se resuelven las ecuaciones a partir de datos de temperaturas medias anuales fijando una fracción solar del 30%. Para estas condiciones se calcula el área inicial que deben tener el total de los paneles. El valor obtenido será sólo aproximativo, ya que una vez se calcule un área, se repetirán todos los cálculos empleando ya si datos de temperaturas medias mensuales, y se iterará variando el número de colectores hasta conseguir una fracción solar anual del 30%.

Se puede resumir el método iterativo en 3 puntos básicos:

- Resolución del sistema de ecuaciones planteado a partir de los balances energéticos del colector, aumentando el área total de colectores hasta obtener una fracción solar de al menos el 30% anual. Las pérdidas de calor no se evalúan mediante los circuitos térmicos en este punto por la dificultad de implementar dichas ecuaciones con las de los B.E.
- Conocidas las temperaturas de entrada y salida del colector se resuelven los circuitos térmicos estimando las temperaturas de los componentes.
- A partir de la ecuación 1 del sistema (B.E en el colector) e imponiendo el resultado de las pérdidas obtenidas en el punto anterior se obtiene un nuevo valor de las temperaturas de entrada y salida del colector que en caso de ser muy diferente al calculado en el punto 1 nos llevará a seguir iterando.

Una vez ha convergido la solución se comprueba la fracción solar, teniendo que repetir los cálculos aumentando el número de colectores en caso de obtener una fracción solar menor de la requerida.

a) RESULTADOS DE LAS ITERACIONES CON DATOS ANUALES:

Para empezar a resolver el sistema con datos anuales se imponen las siguientes condiciones iniciales:

- $N_{\text{paneles}} = 5$ Impongo como condición inicial el número de paneles obtenido mediante el método F-Chart
- $f = 0,3$

Los resultados que se obtienen de la primera estimación son los siguientes:

RESULTADOS						
I [W/m ²]	Sc_Total (m ²)		m1 [kg/s]	Tsc [°C]	Teco [°C]	Qútil [W]
	Nc	Sc (m ²)				
478	5	9,3	0,028	32	28	2354

Tabla 3.5: Tabla de resultados con valores anuales.

Una vez calculados las temperaturas de entrada y salida del colector, se procede a analizar las pérdidas mediante la aplicación de los circuitos térmicos equivalentes y se recalculan las temperaturas obteniendo el área necesaria para obtener la fracción solar requerida del 30%.

El método empleado se explica con detalle dentro del *Anexo de hojas de Cálculo*.

CIRCUITO PÉRDIDAS_CALOR ÚTIL (1)					
	Qútil [W]	ΣR _t [K/W]	Ncol	Area total colectores	F
Paso1	2354,31	0,0143	5	9,34	0,301
Paso2	2284,83		5	9,34	0,292
paso3	2741,80		6	11,208	0,350

Mecanismo simplificado de cálculo

- En el paso 1 simplemente se escriben los resultados obtenidos de la solución del sistema de ecuaciones con datos anuales (tabla 3.5).
- En el paso 2 se evalúan las pérdidas mediante la aplicación del circuito térmico del panel obteniendo una fracción solar menor que el mínimo exigido por la normativa.
- En el paso 3 se incrementa el número de paneles calculando nuevamente las temperaturas y repitiendo los pasos anteriores.

Finalmente el campo de colectores calculado tendrá 6 paneles solares y una fracción solar del 35%. Este valor nos sirve para obtener un área inicial en los cálculos mensuales.

Los resultados de las temperaturas de cada elemento de la instalación se muestran en la siguiente tabla:

RESULTADOS INSTALACIÓN SOLAR						
Ncolectores = 6						
Tsc [°C]	Teco [°C]	Tcons [°C]	T tanque [°C]	Tico [°C]	Tici [°C]	F
32,11	28,06	26,58	25,63	29,41	25,36	0,35

Tabla 3.6: Resumen de resultados con datos anuales.

b) RESULTADOS DE LAS ITERACIONES CON DATOS MENSUALES:

Una vez hechos los cálculos con datos anuales, se procede a recalcular el dimensionamiento de la instalación con datos mensuales, teniendo en cuenta que la fracción anual debe ser como mínimo del 30%.

El mecanismo de cálculo es más laborioso por tener que realiza las estimaciones de todos los componentes mes a mes con temperaturas medias mensuales, lo cual conlleva un cierto error, para posteriormente comprobar mediante la ecuación de B.E en el colector solar que los resultados son coherentes con lo esperado y las estimaciones realizadas son correctas.

La forma de realizar las iteraciones sigue los mismos puntos explicados en la introducción del apartado 3.5.4

▪ **ITERACIÓN 1**

En la tabla se muestran los resultados obtenidos en el primer cálculo en el que no se analizan las pérdidas de calor que tienen lugar en el colector mediante la aplicación de los circuitos térmicos explicados en el capítulo 2.

Caudal nominal de 1 panel [l/h]	100
Numero de paneles	5
Sc (m2)	1,868

Nota: Condiciones iniciales de cálculo. Se comienza con 5 colectores para poder comprobar la variación de los resultados al aplicar las ecuaciones de pérdidas de calor.

Tsco [°C]	Teco [°C]	Tico [°C]	Tici [°C]	Ttanque [°C]
16,23	14,06	14,78	12,61	12,81
25,52	21,49	22,84	18,81	19,14
28,88	25,00	26,29	22,42	22,69
35,68	31,27	32,74	28,33	28,60
48,24	41,58	43,80	37,14	37,55
58,27	51,88	54,01	47,61	47,90
62,45	57,25	58,98	53,78	53,95
52,69	48,47	49,88	45,66	45,79
35,50	31,15	32,60	28,25	28,53
34,32	30,00	31,44	27,13	27,41
20,28	17,83	18,64	16,20	16,42
13,20	11,77	12,24	10,81	10,95

La fracción solar resultante de la primera iteración: **F_1** **0,3096**

F	0,102	0,217	0,257	0,354	0,546	0,765	0,891	0,707	0,338	0,328	0,122	0,063
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabla 3.7: Resumen de los resultados obtenidos en la primera solución del sistema de ecuaciones.

Como se puede observar, el resultado obtenido sería válido por cumplir con la fracción solar mínima exigible.

El resultado de la fracción solar es menor que el obtenido mediante el método F-Chart aunque el campo resultante de colectores sería el mismo para los dos métodos en este punto.

▪ *ITERACIÓN 2*

El siguiente paso evalúa las pérdidas de calor mediante los circuitos térmicos equivalentes que se muestran en el Capítulo 2 y se calcula de nuevo la fracción solar de la instalación para la nueva situación teniendo en cuenta que las temperaturas alcanzadas serán algo menores que las calculadas en la tabla anterior.

Q_util [W]	Q_ACS [W]	F
1604	12383	0,1296
1696	10795	0,1571
2247	8776	0,2560
2404	7250	0,3316
2303	7096	0,3245
2549	4859	0,5245
2514	3394	0,7408
2304	3471	0,6637
2527	7490	0,3373
2185	7653	0,2854
2102	11669	0,1802
1592	13209	0,1205

F_2 **0,2654**

Tabla 3.8: Fracción solar en la iteración 2.

Como se aprecia, el valor de la fracción solar evaluando las pérdidas mediante los circuitos térmicos no llega al mínimo exigido, teniendo por tanto que aumentar el número de colectores y volviendo a resolver el sistema de ecuaciones.

▪ **ITERACIÓN 3**

Caudal nominal de 1 panel [l/h]	100
Numero de paneles	6
Sc (m2)	1,868

Se aumenta el número de paneles para lograr una fracción solar suficiente. Procediendo de igual modo que en el punto 2, se calculan las temperaturas nuevamente mediante la evaluación de los circuitos térmicos obteniendo el siguiente resultado. En la siguiente tabla se muestran las temperaturas de los componentes:

Tsco [°C]	Teco [°C]	Tico [°C]	Tici [°C]	Ttanque [°C]
17,86	15,56	16,326	14,027	14,207
20,33	17,90	18,705	16,275	16,446
27,96	24,74	25,811	22,592	22,786
33,33	29,89	31,034	27,589	27,770
33,47	30,17	31,274	27,974	28,147
43,68	40,02	41,242	37,589	37,726
53,63	50,02	51,226	47,623	47,720
49,48	46,18	47,278	43,977	44,065
34,50	30,88	32,083	28,462	28,662
30,72	27,59	28,635	25,504	25,677
23,92	20,91	21,910	18,897	19,134
17,36	15,08	15,836	13,554	13,745

Tabla 3.9: Resumen de las temperaturas alcanzadas en los componentes del sistema solar.

Y la fracción solar que se alcanza con el nuevo dimensionamiento y aplicando las pérdidas de calor del colector que tienen en cuenta la dirección y magnitud del viento se muestra en la siguiente tabla.

Q_util [W]	Q_ACS [W]	F
1977,38	12383,05	0,16
2161,12	10795,48	0,20
2932,40	8776,42	0,33
3123,02	7250,12	0,43
3052,56	7095,86	0,43
3405,70	4859,12	0,70
3456,65	3393,67	1,02
3176,96	3470,80	0,92
3350,09	7490,08	0,45
2870,89	7652,91	0,38
2597,43	11668,65	0,22
2013,34	13208,59	0,15

F_3	0,348
-----	-------

Por tanto, a la vista de los resultados obtenidos se deduce que el campo de colectores debe estar compuesto por un total de 6 colectores.

3.5.5 CONCLUSIONES

Comparando los dos métodos de cálculo realizados, F-chart y método iterativo mediante resolución de un sistema de ecuaciones y posterior análisis de las pérdidas por transferencia de calor, se concluye lo que se pretendía demostrar, esto es, que los cálculos basados en la recta de normalización no dimensionan de forma precisa las pérdidas que tienen lugar en el panel solar por no incluir el efecto del viento ni la degradación óptica del panel con el paso del tiempo.

Pese a los resultados obtenidos, cabe destacar como ya se ha dicho anteriormente en la crítica a la metodología de cálculo mediante métodos iterativos, que la estimación de las pérdidas con expresiones experimentales empleando temperaturas medias mensuales lleva implícito un error bastante elevado, ya que estas temperaturas son estimadas suponiendo un comportamiento del colector que no tienen por qué parecerse al real pues éste depende totalmente de las condiciones climatológicas horarias y de la demanda de ACS.

Aún así, estos resultados son un paso más hacia la búsqueda de una mejor caracterización de la recta de normalización de los paneles solares de cara a un mejor ajuste en el

dimensionamiento del campo de colectores necesario para cumplir el aporte solar exigido por la normativa. La mejor solución que se puede plantear es en un futuro integrar el efecto de las pérdidas del colector teniendo en cuenta los efectos del viento y las pérdidas ópticas en una recta de normalización rectificadora y más precisa, para así poder aplicar estos resultados directamente a los métodos de cálculo actuales como el F-Chart.

Debido a que en el *PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS PARA INSTALACIONES DE BAJA TEMPERATURA* se recomienda el método F-Chart como método de cálculo, la instalación de Pontevedra se dimensiona según los resultados obtenidos por este método.

3.6 ESQUEMA PRINCIPAL DE LA INSTALACIÓN DE ACS, COMPONENTES PRINCIPALES Y FUNCIONAMIENTO.

En función de los requisitos de demanda, del espacio disponible en la sala de calderas, del presupuesto y de otros factores, la instalación solar dispondrá de más o menos elementos y de una configuración diferente. Existen muchas posibilidades a la hora de diseñar la instalación solar aunque el principio de funcionamiento será muy parecido para todos los casos.

A continuación se indicarán los componentes principales de los que constará la instalación solar del bloque de viviendas en Pontevedra, se describirá brevemente su función y su dimensionamiento y finalmente se mostrará un esquema de principio de la instalación completa explicando algunos puntos importantes del diseño realizados para mejorar la respuesta del sistema solar desde el punto de vista energético ante la demanda de ACS por parte de los usuarios finales.

Una vez diseñados todos los componentes se buscará en el mercado la solución más económica que cumpla con las especificaciones y condiciones requeridas seleccionándose cada componente que conformará la instalación solar completa. En el capítulo dedicado a los catálogos se mostrarán los elementos escogidos y sus características técnicas.

3.6.1 CALDERA DE APOYO

La instalación de energía solar ha sido dimensionada de modo que se estima que el 30% de la demanda anual de ACS será cubierta por energía solar. Esto hace que sea necesario instalar una caldera de apoyo para atender la demanda cuando el sistema solar por si solo no pueda elevar la temperatura del ACS a la temperatura de consumo, es decir, a 60°C.

El dimensionamiento de la caldera se siguiendo el cálculo recomendado por el DTIE 1.01. Según este método para una vivienda típica estándar se suponen los siguientes datos de partida:

- Consumo diario de una vivienda estándar (Qd): 150 L
- Temperatura de entrada del agua: 10 °C
- Temperatura de preparación: 60 °C

Para el cálculo de la potencia se siguen los siguientes pasos:

1. Cálculo del número de viviendas estándar:

En función de las características de las viviendas según el número de baños y la capacidad de las bañeras que tengan se aplica un coeficiente de corrección. En cada vivienda existen 4 baños con su respectiva bañera. El consumo del grifo de la cocina se supone común a todas las viviendas.

$$N_{VE} = 7 \cdot 2,3 = 16,1 \text{ viviendas estándar}$$

2. Caudal máximo en horario punta

Se estima en un 75% el consumo total diario para realizar este cálculo. Además se emplea un factor de simultaneidad que tiene en cuenta tanto el número de viviendas que demandan ACS en horario punta y las pérdidas en las redes de distribución

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{N_{VE} - 1}} + 0,17 = 0,419$$

$$C_{max} = \frac{0,75 Q_d \cdot N_{VE} \cdot \varphi}{3600} = 0,211 \text{ l/s}$$

3. Tiempo de preparación y de duración del periodo punta

$$T = 5 \cdot \frac{N_{VE}^{0,905}}{15 + N_{VE}^{0,92}} \cdot 3600 = 7979,7 \text{ segundos de periodo punta}$$

$$T_{prep} = 2h \cdot 3600 = 7200 \text{ s}$$

Para el tiempo de preparación se suele coger un valor comprendido entre 1 y 3 h, para este proyecto se ha empleado el valor de 2 h.

4. Volumen útil de acumulación

Cálculo del volumen de acumulación que hay que realizar para satisfacer la demanda de ACS. Se aplica un factor de forma en donde se está teniendo en cuenta la estratificación del tanque de acumulación y el número de tanques (en este caso 2 en serie como se verá más adelante)

$$V_{\text{útil}} = \frac{C_{max}}{\frac{1}{T} + \frac{1}{T_p \cdot f}} = 725,7 \text{ L}$$

En donde;

- f: factor de estratificación del depósito de ACS en donde se tiene en cuenta el número de depósitos que se emplean y la relación Altura/Diámetro

5. POTENCIA DE CALDERA PARA ACS

$$P_{caldera} = 1,05 \cdot \frac{4,19 \cdot (T_p - T_e) \cdot C_{max} \cdot T}{T + T_{prep}} = 24 \text{ KW}$$

Para el cálculo de la potencia de la caldera se aplica un coeficiente para tener en cuenta las pérdidas de distribución. Por tanto,

En cuanto a lo que se refiere en configuración de la caldera hay dos posibles configuraciones de la caldera con el depósito acumulador:

- Caldera en serie con el depósito acumulador
- Caldera en paralelo con el depósito acumulador

Antes de explicar el funcionamiento de la caldera según la configuración, se añade que para la instalación solar se ha decidido emplear dos tanques de almacenamiento en serie, uno que denominaremos solar y otro de ACS. De este modo mejora el rendimiento de los paneles solares aparte de otras ventajas que se comentan cuando se dimensionen estos. Simplemente se realiza esta aclaración para comprender mejor el funcionamiento de la caldera de apoyo.

La caldera para la producción de ACS se puede poner en dos configuraciones posibles, en serie con el depósito de ACS. En el tanque según los cálculos realizados en el *capítulo 3* se obtienen temperaturas medias entre 30 y 50°C según el mes del año. Realmente si habrá periodos en donde el tanque si alcanzará la temperatura de 60°C (temperatura de suministro de ACS), pero por normal general no será así. Esto implica que cada vez que exista demanda de ACS en alguna vivienda la caldera de apoyo tendrá que encenderse para elevar la temperatura del tanque de ACS hasta la de suministro, con lo cual, en la mayoría de los casos la caldera se encenderá siempre que haya demanda. El rendimiento de la caldera funcionando de este modo disminuye con respecto a un funcionamiento más estable y modulable. Otro inconveniente de la configuración en serie de la caldera es la imposibilidad de realizar un tratamiento de legionela al tanque de ACS, el cual se debe elevar hasta una temperatura en torno a los 70°C, aunque actualmente este tratamiento no es obligatorio en edificios de viviendas.

La opción que se escoge para este proyecto es la configuración en paralelo, de modo que la caldera mantendrá el tanque de ACS (no el solar) a una temperatura próxima a los 60°C, encendiéndose la caldera cada vez que la temperatura del tanque de ACS disminuya por

debajo de un valor consigna próximo a los 55°C. Funcionando de este modo se eleva el rendimiento de la caldera de forma notable y se evita que tenga que funcionar de forma simultánea a la demanda. El hecho de poner dos tanques de almacenamiento me permite emplear esta configuración en paralelo, ya que con un solo tanque estaría disminuyendo el rendimiento de los paneles de una forma considerable. El tanque solar sólo será calentado por el fluido que circula por el campo de colectores, y de este se enviará el fluido más caliente al tanque de ACS y el fluido más frío a los paneles solares, de modo que su rendimiento no caiga.

La opción de poner la caldera de apoyo en paralelo a priori parece tener un gran inconveniente. Al tener el depósito de ACS a una temperatura próxima a 60°C, en muchas ocasiones, cuando $T_{Tanque_ACS} > T_{Tanque_Solar}$, no se podrá mandar el fluido del tanque solar al de ACS para no enfriarlo. La solución que se suele optar es la de aprovechar el calor solar por la noche, cuando no suele existir demanda de ACS. También se aprovecha el calor del depósito solar para la calefacción, ya que a pesar de no haber dimensionado el área de los paneles para dar servicio de calefacción, si será posible aprovechar este calor. Esta opción es viable cuando los consumos medios de ACS son elevados, en el caso de una sola vivienda no sería la mejor opción y la configuración caldera en serie con el depósito de ACS sería la ideal.

La caldera que se instalará tendrá incorporado el quemador y será de tipo modulante para poder regular su funcionamiento según la carga de trabajo existente en función de la temperatura del agua del depósito de ACS y de la demanda.

3.6.2 DEPÓSITO ACUMULADOR SOLAR Y DEPÓSITO ACUMULADOR PARA ACS.

La función del depósito acumulador es la de almacenar la energía en forma de agua caliente. Es totalmente necesario para poder adecuar la disponibilidad de la energía solar a la demanda de esta, ya que generalmente ambas variables no coinciden.

Los puntos más importantes que hay que tener en cuenta para la elección del tanque de almacenamiento y para su correcto funcionamiento son:

- Aislamiento adecuado para disminuir las pérdidas de calor. El aislamiento se determina en función de la temperatura de ACS almacenada (60°C), de la temperatura ambiente de la sala donde se encuentra el situado (aprox 10°C) y de la caída de temperatura del agua acumulada para que esta sea lo mínima posible.
- Válvula de expansión para el caso de tener que evacuar vapor si se alcanzasen temperaturas mayores de los 100°C
- Válvula que permita el conexionado del tanque con el agua de la red general de distribución para compensar la pérdida de líquido.
- Volumen del tanque suficiente para atender la demanda (suele ser función del tamaño del campo de colectores de modo que sea capaz de recoger toda la energía solar de un día de irradiación normal)

1. Dimensionamiento del acumulador:

En el PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS DE B.T recomiendan dimensionar el depósito acumulador para que cumpla la siguiente relación:

$$50 < V/A < 180$$

Para afinar un poco la selección del volumen del acumulador se tienen en cuenta también factores de servicio, en este caso se sabe que el desfase entre la captación y el consumo de la energía no son superiores a 24 horas, con lo cual el volumen del tanque no debe ser tan grande como si hubiese desfase entre captación y consumo de un mayor número de horas. Además hay que tener en cuenta el consumo diario medio, próximo a los 1300 litros.

El volumen del depósito será de: $V = 1500 \text{ litros}$; siendo $\frac{V}{A} \sim 75$

A parte de ser importante el almacenamiento del calor captado, también lo es el grado de estratificación del agua almacenada, siendo cuanto mayor posible mejor, pues se consigue de este modo mandar el fluido a los paneles solares lo más frío posible aumentando así el rendimiento de los colectores. Para lograr una mejora en la estratificación se opta por poner dos depósitos en serie en vez de uno, cada uno de 750 litros.

2. Funcionamiento de los acumuladores:

A continuación se explica el funcionamiento de la instalación con dos depósitos en serie y se explica el por qué de dicha elección frente a la alternativa de emplear uno solo.

El funcionamiento básico consiste en calentar el primer depósito mediante energía solar de modo que esta agua sea circulada al intercambiador apoyado por la caldera y destinado a almacenar el agua para consumo.

En el primer depósito (depósito Solar) entra el agua calentada por los paneles solares previamente pasando por el intercambiador. De dicho depósito se extrae el agua de la parte superior (parte más caliente) y se circula hacia la parte baja del segundo depósito (depósito de ACS). De este modo el depósito de ACS se irá calentando a medida que entra agua del depósito solar, además, esta configuración permite introducir el agua de red en el depósito solar y no en el de ACS, con las ventajas que ello supone, por una parte no enfriar el depósito de ACS cuando hay consumo y por otra parte mandar el agua del depósito solar a los paneles lo más fría posible mejorando así su rendimiento.

▪ Situación de demanda de ACS:

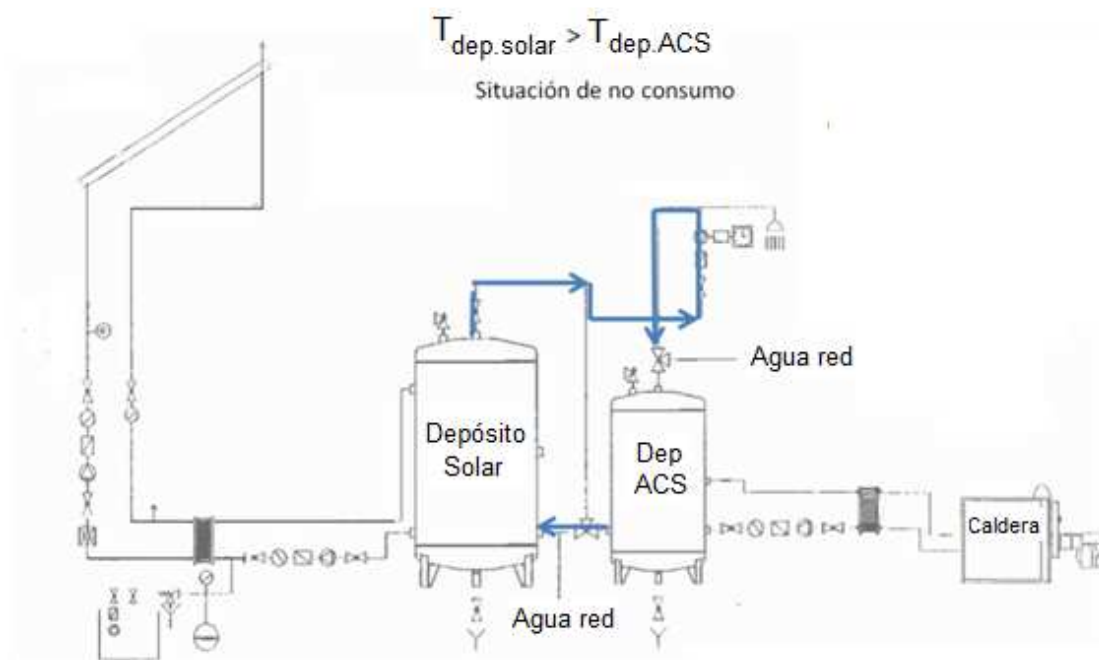
En el momento en que exista demanda de ACS el agua del depósito 2 (ACS) será enviado a consumo, (la temperatura de acumulación se mantendrá a 60°C por acción

de la energía solar y de la caldera de apoyo cuando la energía solar no sea suficiente para estar disponible cuando haya demanda). Al mismo tiempo que se consume ACS va entrando por la parte inferior el agua calentada del depósito solar. Debido a que el depósito solar está descargando agua al depósito de ACS se abrirá la válvula de entrada de agua de la red para rellenar el depósito solar, enfriándolo en esta acción. Cuando la sonda de temperatura llegue al valor de consigna de mínima temperatura se pondrá en funcionamiento las bombas del circuito primario y secundario del solar siempre y cuando la temperatura del fluido en el interior de los colectores sea mayor que la temperatura mínima de consigna del depósito.

▪ **Situación de no demanda de ACS:**

En situación de no demanda puede darse el caso de que el depósito solar tenga mayor temperatura que la del depósito de ACS, para no desperdiciar esa energía existe un circuito controlado por una bomba para realizar el intercambio de agua entre los dos depósitos.

En el siguiente esquema se muestra el camino que marca el sistema de control para que se produzca el intercambio de agua entre los dos depósitos.



Esquema 3.1: Representación del intercambio de agua entre los depósitos cuando no hay consumo. Fuente: Curso de proyectista en instalaciones de energía solar de baja temperatura (COIIM)

Este aspecto es de vital importancia en la instalación, pues en caso de no existir se estaría desperdiciando el calor solar cuando no hubiese demanda en las viviendas y la caldera tendría que encenderse cuando la temperatura del depósito auxiliar estuviese por debajo de la temperatura de consigna programada en el regulador controlador del sistema.

3. Pérdidas de calor en los depósitos:

A partir de las hojas de características de los depósitos IBERSOLAR seleccionados se estiman las pérdidas de calor que se producen en este. El método de resolución simplemente consiste en calcular las resistencias térmicas del depósito en función de los materiales que lo componen y aplicar la ley de Fourier para calcular las pérdidas de calor por conducción. Decir que las temperaturas de los dos depósitos son conocidas, la del depósito solar es el resultado obtenido en la *tabla 3.9* y la del depósito de ACS será de 60°C.

▪ RESISTENCIAS TÉRMICAS:

Las resistencias de conducción térmica se calculan con las expresiones generales a partir de los datos geométricos facilitados por el fabricante.

$$R_{cond} = \frac{e}{kA} \left[\frac{K}{W} \right]$$

$$R_{cond_TANQUE} = \frac{\ln \left(\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right)}{2\pi LK} \left[\frac{K}{W} \right]$$

Mientras que las resistencias de convección se calculan a partir de su expresión general, considerando nula la convección interior. La convección exterior es debida a la convección flujo externo debido a la diferencia de temperatura entre la superficie de la pared del depósito y la temperatura ambiente de la sala de calderas.

$$R_{conv_Exterior} = \frac{1}{h_e A} \left[\frac{K}{W} \right]$$

$$R_{conv_Interior} = 0$$

En donde:

- e : Espesor del material en metros
- k : Conductividad térmica del material medida en $\left[\frac{W}{mK}\right]$
- D_{EXT} : Diámetro exterior del tanque de almacenamiento
- D_{INT} : Diámetro interior del tanque de almacenamiento
- A: Área de transferencia de calor

Para el cálculo del coeficiente convectivo h_{ext} en los tanques de almacenamiento se emplearon las ecuaciones correspondientes a la convección de flujo externo en una pared vertical previa

comprobación de que se cumplía la condición: $\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}}$

El método de cálculo está extraído de la *referencia (5)*.

PÉRDIDAS EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO					
Requiv (K/W)	Ttanque1	Ttanque2	Qtanque1 (W)	Qtanque2 (W)	Qtanque (W)
1,202	13,6	60	0,25	19,55	19,80
	17,6	60	0,67	18,30	18,97
	26,7	60	3,60	17,47	21,07
	32,0	60	5,00	16,64	21,64
	33,9	60	4,93	15,80	20,74
	46,4	60	9,30	14,97	24,27
	58,6	60	13,55	14,14	27,69
	57,5	60	12,67	13,72	26,40
	34,8	60	4,49	14,97	19,46
	30,1	60	3,79	16,22	20,01
	18,9	60	0,36	17,47	17,83
	14,1	60	0,02	19,13	19,16

Tabla 3.10: Resumen de las pérdidas de calor en los depósitos de almacenamiento.

3.6.3 INTERCAMBIADORES DE PLACAS

Para realizar el intercambio de calor entre los fluidos de trabajo hace falta la presencia del intercambiador de placas. El intercambiador puede ser un elemento externo e independiente o puede estar interno dentro de un tanque inter-acumulador. Las dos opciones son perfectamente válidas, pero en este caso se opta por diseñar los intercambiadores externos, ya que para la posterior aplicación del solar para calefacción es más adecuado disponer del intercambiador de forma externa.

Para el suministro de ACS se montan dos intercambiadores:

- a) Intercambiador solar
- b) Intercambiador para la caldera de apoyo.

Para aplicaciones de suministro de ACS y calefacción para viviendas con apoyo solar los intercambiadores que se emplean son los de placas por ser los más eficientes.

A continuación se muestran los cálculos correspondientes para hallar el número de placas necesarias para conseguir el funcionamiento deseado del intercambiador. El número de placas será función principalmente de los caudales, de las temperaturas y de las propiedades físicas de los fluidos.

1. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR SOLAR:

El modelo escogido es el **Vitotrans serie 3003485**, debiendo comprobar que cumple los requisitos que necesita la instalación para el correcto funcionamiento e intercambio de calor.

Todas las especificaciones técnicas del intercambiador seleccionado se encuentran anexadas en el capítulo dedicado a la muestra de los catálogos.

Dimensionamiento del intercambiador solar:

Datos geométricos del intercambiador:

$$\begin{aligned}b &:= 0.1 \quad [\text{m}] && \text{Longitud útil} \\d &:= 0.121 \quad [\text{m}] && \text{Ancho} \\e &:= 0.171 \quad [\text{m}] && \text{Altura} \\A_{1p} &:= d \cdot e = 0.021 && \text{Área de transferencia de una placa} \\V_c &:= 0.27 && \text{Volumen del canal de paso (en Litros)} \\a_c &:= 0.0014 && \text{Distancia entre placas (ancho del canal)}\end{aligned}$$

Sección de paso de un canal:

$$\begin{aligned}S_{1\text{canal}} &:= a_c \cdot d = 1.845 \times 10^{-4} \\S_{\text{total}} &:= S_{1\text{canal}} \cdot \left(\frac{n+1}{2} \right) && \text{Siendo } n \text{ el número de placas.}\end{aligned}$$

Longitud característica del canal (para aplicar en el Reynolds):

$$L_c := \frac{4 \cdot a_c \cdot d}{2 \cdot (a_c + d)} = 2.964 \times 10^{-3} \quad \text{Aproximándolo:} \quad l_c := \frac{4 \cdot a_c \cdot d}{2 \cdot d} = 3 \times 10^{-3}$$

$$\text{Método NTU:} \quad \boxed{NTU := \frac{U_{interc} \cdot n_{interc} \cdot A_{1p}}{m \cdot C_p}}$$

$$U_{interc} := \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f} + R_{placa} + R_{suciedad}}$$

$$R_{placa} := \frac{e_{placa}}{k_{placa}} = 3.333 \times 10^{-5} \quad R_{suciedad} := 6 \cdot 10^{-5}$$

Fluido caliente: AGUA

El caudal que escojo es el máximo posible, sin tener en cuenta que puede funcionar a la vez ACS y calefacción, reduciéndose por ello el caudal que circula por el intercambiador.

$$\dot{m}' := 0.8 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{Lo admite el intercambiador seleccionado})$$

$$C_{pc} := 4184 \quad k_{agua,c} := 0.650 \quad \rho_c := 1016 \quad \mu_c := 0.000521$$

$$\dot{m}_{agua,c} := \frac{\dot{m}' \cdot \rho_c}{3600} = 0.226 \text{ kg/s} \quad U_c := \frac{\dot{m}_{agua,c}}{\rho_c \cdot S_{1canal}} = 1.204$$

$$Re_c := \frac{\rho_c \cdot U_c \cdot l_c}{\mu_c} = 6.953 \times 10^3 \quad Pr_c := 3.15$$

$$Nu_c := 0.4 \cdot Pr_c^{0.4} \cdot (2 \cdot Re_c)^{0.64} = 283.814$$

$$h_c := \frac{k_{agua,c} \cdot Nu_c}{l_c} = 6.149 \times 10^4$$

Fluido frío: AGUA

Los resultados son parecidos, ya que el fluido de trabajo es el mismo y se ha considerado que el caudal de agua que circula por el primario del intercambiador es igual que el caudal de agua que circula por el secundario. Sólo cambian las propiedades del fluido por estar a menos temperatura

$$\dot{m}' = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_{pf} := 4180 \quad \rho_f := 1000 \quad k_{agua,f} := 0.613 \quad \mu_f := 0.000851$$

$$\dot{m}_{agua,f} := \frac{\dot{m}' \cdot \rho_f}{3600} = 0.222 \text{ kg/s} \quad U_f := \frac{\dot{m}_{agua,f}}{\rho_f \cdot S_{1canal}} = 1.204$$

$$Re_f := \frac{\rho_f \cdot U_f \cdot l_c}{\mu_f} = 4.226 \times 10^3$$

$$Pr_f := 5.82$$

$$Nu_f := 0.4 \cdot Pr_f^{0.4} \cdot (2 \cdot Re_f)^{0.64} = 263.993$$

$$h_f := \frac{k_{agua,f} \cdot Nu_f}{l_c} = 5.394 \times 10^4$$

La ecuación que resulta es la siguiente:

$$U_{interc} = \frac{h_c \cdot h_f}{\left[(h_c + h_f) \cdot (n_{placas} + 1)^{0.64} \right] + h_c \cdot h_f \cdot (R_{placa} + R_{suciedad})}$$

Por otro camino tengo que estimar otro valor del NTU, para así compararlos y calcular mediante iteraciones el valor del número de placas necesario.

$$\Delta T_{col} := 60 - 47 = 13$$

Dimensiono el intercambiador para unas condiciones de funcionamiento óptimas, ya que con valores promedios no es la mejor opción para el dimensionamiento del intercambiador.

Las temperaturas del secundario las estimaré en 55 / 40 °C

$$\Delta T_{lm} := \frac{60 - 55 - (47 - 40)}{\ln\left(\frac{5}{7}\right)} = 5.944$$

La variación es constante con lo cual el valor de la variación de temperatura es la misma en todo punto.

$$F_{AA} := 1$$

A priori supondré que el valor es uno, lo cual es cierto cuando el número de placas es mayor de 50.

$$NTU_2 := \frac{\Delta T_{col}}{F \cdot \Delta T_{lm}}$$

$$NTU_1 := NTU_2 = 2.187$$

Resuelvo este sistema para conseguir el número de placas que debe tener el intercambiador

$$NTU_1 = \frac{U_{interc} \cdot n_{placas} \cdot A_{1p}}{C_{min}}$$

$$U_{interc} := \frac{NTU_1 \cdot C_{min}}{A_{1p}} = 9.756 \times 10^4$$

La ecuación final es la siguiente:

$$n_{placas} - 3.39 \cdot (n_{placas} + 1)^{0.64} = 9.1$$

$$n_{placas} := 51$$

Número de placas útiles para el intercambio de calor.

Comprobación de que cumple la hipótesis de flujo turbulento:

$$Re_{fc} := \frac{Re_c}{\left(\frac{n_{placas} + 1}{2}\right)} = 267.423 \quad \text{El valor es suficientemente grande para suponer que ya no está en régimen laminar (Re > 10)}$$

$$U_{int_solar} := \frac{h_c \cdot h_f}{\left[(h_c + h_f) \cdot (n_{placas} + 1)^{0.64} \right] + h_c \cdot h_f \cdot (R_{placa} + R_{suciedad})} = 1.888 \times 10^3$$

$$Q_{int_Solar} := U_{int_solar} \cdot n_{placas} \cdot A_{1p} \cdot \Delta T_{lm} = 1.211 \times 10^4 \quad \text{Cumple todas las especificaciones de potencia, caudal y temperaturas de funcionamiento.}$$

La potencia del intercambiador de ver estar en torno a $Q = 12 \text{ KW}$

Otro criterio que suele emplearse para la elección del intercambiador solar es seleccionando la potencia requerida en función del área total de paneles instalados. La relación que debe cumplirse es la siguiente:

$$P \geq 150 \cdot A_{colectores} \geq 14 \text{ KW}$$

La diferencia de criterios se debe a que en el primer caso el intercambiador se ha diseñado para condiciones de uso normales teniendo en cuenta los saltos de temperaturas que se van a producir en el intercambiador cuando esté en funcionamiento, mientras que el segundo método es más general y menos preciso.

Finalmente, el modelo del intercambiador escogido es el **Vitotrans serie 3003486** de potencia de intercambio 25 KW.

2. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE ACS:

De modo similar se diseña el intercambiador de ACS que se sitúa entre la caldera de apoyo y el depósito de ACS, de modo que intercambia calor cuando la temperatura del depósito es menor de lo requerido.

No se vuelve a repetir el método de cálculo por ser exactamente igual que para el intercambiador solar, lo único que se definirán son las condiciones de diseño para lo cual se han supuesto unas temperaturas de funcionamiento típicas en una instalación de ACS.

Temperaturas de diseño del intercambiador

- ❖ Temperaturas de trabajo del fluido caliente (circuito primario): $T_c = 70 - 80^\circ\text{C}$
- ❖ Temperaturas de trabajo del fluido frío (circuito secundario): $T_f = 40 - 45^\circ\text{C}$

La ecuación resultante para el cálculo del número de placas necesario para el intercambio de calor es:

$$n_{\text{placas_acs}} - 2.366(n_{\text{placas_acs}} + 1)^{0.64} = 6.85 \quad n_{\text{placas_acs}} := 27$$

El coeficiente global de pérdidas y el calor intercambiado son:

$$U_{\text{int_acs}} := \frac{h_{\text{c_acs}} \cdot h_{\text{f_acs}}}{\left[(h_{\text{c_acs}} + h_{\text{f_acs}}) \cdot (n_{\text{placas_acs}} + 1)^{0.64} \right] + h_{\text{c_acs}} \cdot h_{\text{f_acs}} \cdot (R_{\text{placa}} + R_{\text{suciedad}})} = 2.739 \times 10^3$$

$$Q_{\text{int_ACS}} := U_{\text{int_acs}} \cdot n_{\text{placas_acs}} \cdot A_{1p} \cdot \Delta T_{\text{lm_acs}} = 1.789 \times 10^4$$

La potencia del intercambiador para ACS debe a $Q = 18 \text{ KW}$

El modelo del intercambiador escogido es el mismo que el intercambiador solar, **Vitotrans serie 3003485** de potencia de intercambio 19 KW.

3.6.4 DISEÑO DEL CIRCUITO HIDRÁULICO DE LA INSTALACIÓN

El circuito hidráulico lo conforman la red de tuberías y las bombas de circulación. Para realizar su diseño se deben considerar los siguientes parámetros:

1. Caudal que circula por los paneles
2. Diámetro óptimo de la tubería
3. Elección del grupo de bombas
4. Pérdidas de calor en el circuito de tuberías

Para realizar el dimensionamiento de la red de tuberías y de las bombas se diferencia entre el circuito primario solar, el secundario y el circuito de distribución de ACS ya que las condiciones son diferentes entre los tres circuitos.

CIRCUITO PRIMARIO SOLAR

- $Caudal_{\text{paneles}} = 5 \text{ paneles} \cdot 100 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 500 \frac{\text{litros}}{\text{h}} = 1,39 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

- $D_{opt} = \sqrt{\frac{Q}{u} \cdot \frac{4}{\pi}} = 20,4 \text{ mm}$ en donde,
 - Q: Caudal total que circula por los paneles
 - U: Velocidad del fluido en el interior de las tuberías = 0,425 m/s.
Esta velocidad se escoge a en función de la demanda energética existente empleando para ello información obtenida de la *referencia 4*

En este caso da la casualidad que el diámetro óptimo coincide con un diámetro nominal, con lo cual, el diámetro seleccionado para las tuberías será el óptimo:

$$DN = 20,4 \text{ mm}$$

- La elección de la bomba ha de tener la potencia suficiente para compensar las pérdidas de cargas provocadas por:
 - La circulación del fluido y el caudal que tiene que mover.
 - La diferencia de altura (metros de columna de agua) que tiene que superar para poder circular el fluido.

PÉRDIDA DE CARGA

La expresión que define la pérdida de presión es la siguiente:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho Q^2}{A^2}$$

- f: Factor de fricción, es función del número de Reynolds y de la *rugosidad relativa* $\frac{\varepsilon}{D}$
- L: Longitud total que recorre el fluido desde el sótano hasta los paneles estos incluidos.
- A: Área de transferencia de la tubería.

$$\text{Con } \frac{\varepsilon}{D} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ y } Re = 18450 \Rightarrow f = 0,02$$

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho Q^2}{A^2} = 0,02 \cdot \frac{43}{0,0204} \cdot \frac{1000 \cdot (1,39 \cdot 10^{-4})^2}{\left(\frac{\pi \cdot 0,0204^2}{4}\right)^2} = 7,62 \text{ KPa} \Rightarrow \Delta H_p = 0,78 \text{ m.c.a}$$

POTENCIA REQUERIDA POR LA BOMBA:

Una vez conocida la pérdida de carga se procede a calcular la potencia necesaria de la bomba para impulsar el fluido desde la sala de calderas en el sótano del bloque de viviendas hasta el tejado donde están situados los paneles solares.

$$W_b = \frac{Q \cdot \Delta P_{total}}{\eta} = 238,8 \text{ W}$$

En donde;

- $\Delta P_{total} = \rho \cdot g \cdot (\Delta H + \Delta H_p)$
- $\eta = 0,25$

Una vez conocida la potencia, el caudal que debe impulsar y los metros de columna de agua que debe superar se puede escoger la bomba más adecuada para dicho cometido.

CIRCUITO SECUNDARIO SOLAR

Para el circuito secundario del solar se procede del mismo modo teniendo en cuenta que el caudal a circular será el mismo pero no la longitud de la red de tuberías y por tanto la pérdida de carga cambiará.

Los parámetros a definir son:

1. $Caudal_{paneles} = 5 \text{ paneles} \cdot 100 \frac{l}{h} = 500 \frac{\text{litros}}{h} = 1,39 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$
2. $DN = 20,4 \text{ mm}$
3. Cálculo de la potencia de la bomba del secundario.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho Q^2}{A^2} = 0,37 \text{ KPa} \Rightarrow \Delta H_p = 0,038 \text{ m.c.a}$$

$$W_b = \frac{Q \cdot \Delta P_{total}}{\eta} = 21,83 \text{ W}$$

La bomba para el circuito secundario requiere mucha menos potencia ya que en este caso es una bomba de circulación del fluido desde el depósito solar hasta el intercambiador de calor solar.

CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN DE ACS

Se calcula del mismo modo que las anteriores bombas, es decir, en función del caudal máximo de consumo y de la potencia requerida para la impulsión.

1. $Caudal_{m\acute{a}x} = 371 \frac{l}{h} = 1,03 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$
2. $D_{opt} = \sqrt{\frac{Q}{u} \cdot \frac{4}{\pi}} = 17,5 \text{ mm} \Rightarrow DN = 20,4 \text{ mm}$
3. La elección de la bomba ha de tener la potencia suficiente para compensar las pérdidas de cargas provocadas por:

PÉRDIDA DE CARGA

La expresión que define la pérdida de presión es la siguiente:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho Q^2}{A^2}$$

$$\Delta P = 10,9 \text{ KPa} \Rightarrow \Delta H_p = 1,1 \text{ m. c. a}$$

$$W_b = \frac{Q \cdot \Delta P_{total}}{\eta} = 392,5 \text{ W}$$

En donde;

- $\Delta P_{total} = \rho \cdot g \cdot (\Delta H + \Delta H_p)$
- $\eta = 0,25$

Para concluir el cálculo de las bombas necesarias se muestra la siguiente tabla en donde se recopilan todos los cálculos realizados.

Dimensionamiento de las bombas para ACS

CIRCUITO HIDRÁULICO																		
Primario Solar							Secundario Solar					Distribución ACS						
L1	L2	L_TOTAL (m)	Q 1º[L/h]	D(mm)	Sección	P_bomba	L1 (m)	Q 2º [L/h]	D(mm)	Sección	P_bomba	H0	H1	L Ppal (m)	Qdistrib [L/h]	D(mm)	Sección	P_bomba
20	23	43	500	20	327	239	4	500	20	327	22	2	3	94	370	18	242	393
			DN	20,4				DN	20,4							DN	20,4	

Dens (kg/m3)	1000
U (m/s)	0,425
Rugosidad Cu	0,015
ν agua	5E-07

Tabla 3.10: Resultados de los requisitos de los circuitos hidráulicos 1º, 2º solar y de distribución de ACS.

➤ **Pérdidas de calor en el circuito de tuberías**

Por último se procede a calcular las pérdidas de calor que tienen lugar en los circuitos de tuberías de la instalación solar. Hay que tener en cuenta que una parte del circuito de tuberías irá por el exterior (circuito solar que lleva el fluido a los paneles) y otra parte estará situada en la sala de calderas, que será la planta sótano.

La forma de calcular las pérdidas es mediante la aplicación de las expresiones de transferencia de calor y el cálculo de las resistencias térmicas equivalentes en los conductos. Las resistencias que aparecen son las de convección interior (por circulación del fluido de trabajo), conducción y convección exterior (dependerá de si la tubería es exterior o interior por efectos del viento y de temperatura)

PÉRDIDAS CONDUCTOS														
DATOS		RESISTENCIAS TÉRMICAS				PÉRDIDAS TÉRMICAS [W]								
R1 (mm)	20,4	Exterior				Requ ext	Tsco [°C]	Teco [°C]	Tamb [°C]	T sótano [°C]	Qext (ida)	Qext (ret)	Qint (ida)	Q int (ret)
R2 (mm)	25	Rh ext	Rcond aisl	Rcond Cu	Rh int	(W/K)	17,55	15,03	11	13	0,77	1,24	1,53	0,68
R3 (mm)	45	0,354	0,492	1,7E-05	0,78	1,6262	22,96	19,56	12	16	1,05	2,32	2,35	1,20
Kaisl (W/mK)	0,038						34,90	29,72	14	18	1,59	4,83	5,71	3,95
Kcu (W/mk)	384	Interior				Requ int	40,60	35,23	16	20	1,65	5,91	6,95	5,14
Lconduc int (m)	11,5	Rh ext	Rcond aisl	Rcond Cu	Rh int	(W/K)	42,82	37,21	18	22	1,72	5,91	7,03	5,13
Lconduc ext(m)	10	0,209	0,492	1,7E-05	0,780	1,4814	56,13	50,05	20	24	1,87	9,24	10,84	8,79
hext (W/m2*K)	23,723						68,13	62,29	22	26	1,79	12,39	14,22	12,25
hint (W/m2*K)	1880,716						66,90	61,09	23	27	1,79	11,71	13,47	11,50
U fluido (m/s)	0,425						44,69	38,48	20	24	1,91	5,68	6,98	4,89
U viento(m/s)	2,8						38,29	33,17	17	21	1,57	4,97	5,84	4,11
agua	Cp (J/kg*K)	4187					24,41	20,87	14	18	1,09	2,11	2,16	0,97
	dens (kg/m3)	1000					18,63	15,70	12	14	0,90	1,14	1,56	0,57
	μ (N*s/m2)	0,000855												
	Kagua (w/m*K)	0,613												
aire	Cp (J/kg*K)	1000												
	dens (kg/m3)	1												
	μ (N*s/m2)	1,71E-05												
	Kaire (w/m*K)	2,40E-02												

Tabla 3.11: Resultados de las pérdidas de calor en las tuberías del circuito primario.

3.6.5 VALVULERÍA

Toda la red de tuberías está conexasionada por válvulas que regulan el funcionamiento de la instalación en función de las condiciones instantáneas y de la programación que tenga. Existen diferentes tipos de válvulas dependiendo de la función que desempeñen. A continuación se nombran los tipos más básicos que se emplearán en el proyecto de la instalación de Pontevedra.

- **Válvulas de retención:** Para evitar la circulación del fluido en sentido inverso. Este problema puede darse por ejemplo cuando hay instaladas bombas en paralelo y una de ellas está parada, la baja presión en el circuito de la bomba parada podría hacer que parte del fluido tendiese a introducirse en el, con la válvula de retención se evita este problema.
- **Válvulas de corte:** También se incluyen válvulas de corte de tipo esfera a la entrada y salida de todos los componentes, de tal modo que permitan una fácil sustitución o reparación sin necesidad de realizar el vaciado completo de la instalación. Estas válvulas irán taradas según condiciones extremas de funcionamiento de cada uno de dichos componentes, es decir, se instalarán una válvula de corte en la impulsión y retorno del campo de colectores, en la aspiración e impulsión de la bomba, y en todas las entradas y salidas al depósito y al intercambiador.
- **Válvulas de 3 vías:** permiten cambiar el modo de funcionamiento “normal” del circuito, La válvula de 3 vías permite que el fluido circule en una dirección o en otra en función de si existe consumo o no y de la temperatura de los depósitos de almacenamiento;
- **Válvulas de seguridad:** Todos los circuitos irán provistos de válvulas de seguridad de tipo resorte taradas a una presión que garantice que en cualquier punto no se superará la presión máxima de trabajo del elemento más delicado de la instalación, es

decir la presión de diseño. Estas válvulas irán situadas en el campo de colectores, vaso de expansión y acumulador.

3.6.6 SISTEMA DE LLENADO Y VACIADO

Los circuitos que empleen vaso de expansión deben incorporar un sistema de llenado manual o automático que permitan mantener el circuito presurizado.

El llenado del circuito se realizará a través de una válvula de tipo esfera debiendo incluirse además una válvula de retención que impida la salida del agua desde el circuito a la red de alimentación.

En cuanto al vaciado, se realizará por el punto más bajo de la instalación a través de válvulas de esfera.

3.6.7 VASOS DE EXPANSIÓN

La misión del vaso de expansión es la de compensar las dilataciones producidas en el fluido térmico debido a su calentamiento para evitar que la presión aumente y que se produzcan problemas en el funcionamiento de la instalación. El vaso de expansión por tanto absorberá esas dilataciones introduciéndose fluido en el.

Para realizar su dimensionamiento en el circuito primario de los colectores se debe cumplir la condición exigida por el RITE de poder arrancar la bomba del circuito solar de forma automática después de una interrupción de suministro y consecuente parada de la bomba con condiciones de radiación máxima. Esto se debe a que debido a la parada de la bomba y actuación del vaso de expansión puede producirse una bajada de presión en la aspiración de la bomba tal que una vez los parámetros de funcionamiento exijan que la bomba vuelva a arrancar esta no pudiese hacerlo por no poder superar la diferencia de presión entre aspiración e impulsión.

- Dimensionamiento:

El dimensionamiento del vaso de expansión es función del volumen del circuito en la que se sitúa y de las presiones. Sólo se va a dimensionar el vaso del circuito solar por ser el que mayor diferencia de temperaturas soporta.

$$V_{Vaso} = V_{componentes} \cdot (0,2 + 0,01 \cdot h_{Vaso})$$

$$V_{componentes} = V_{tuberías} + V_{colectores} + V_{intercambiador}$$

- $V_{tuberías} = L_{tuberías} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 0,0135 \text{ m}^3$
- $V_{colectores} = N_{colectores} \cdot V_{1colector} = 5 \text{ litros}$
- $V_{intercambiador} = 0,3 \text{ litros}$

$$V_{Vaso} = 6 \text{ litros}$$

La función del vaso de expansión es muy importante y su colocación en el circuito primario es un aspecto que hay tener en consideración para evitar problemas de **sobrecalentamiento** y de **estancamiento**. Este problema se analiza a continuación con más de detalle, ya que hoy día es un problema que está afectando a muchas instalaciones solares por la falta de información y conocimiento. Todos los análisis que se explican en el siguiente punto están basados en estudios experimentales contrastados y obtenidos de la *referencia 6*.

EL ESTANCAMIENTO EN INSTALACIONES SOLARES:

El estancamiento es la ausencia de circulación de agua cuando hay radiación solar, lo que conlleva el calentamiento de esta pudiendo llegar fácilmente a las condiciones de saturación del agua (temperatura de evaporación a la presión de saturación) si se produce un mal diseño del conjunto formado por: bomba de circulación, válvula antirretorno y vaso de expansión.

Según dicta la normativa HE4 del CTE, sección 3.4.7.2.1: Las instalaciones solares deben estar diseñadas para soportar el estancamiento (parada de la bomba) cuando la radiación solar sea máxima, y restablecer la operación automáticamente cuando la potencia esté disponible de nuevo.

CONDICIONES DEL ENSAYO REALIZADO

El estudio realizado mide las temperaturas en 20 lugares del circuito primario del circuito solar, las condiciones de ensayo son las siguientes:

- Radiación constante de 1000 W/m^2 ,
- Superficie de captación de 8m^2 (4 colectores)
- Temperatura de estancamiento es de 189°C

Las condiciones del ensayo se asemejan a la instalación dimensionada para el bloque de viviendas de Pontevedra, con lo que los resultados obtenidos son perfectamente aplicables al proyecto que se estudia.

A continuación se estudian dos casos posibles de diseño en función de la colocación del vaso de expansión en la impulsión o en el retorno de la bomba, analizándose como una vez se para la bomba por falta de demanda evolucionan las temperaturas y presión en diversos puntos del circuito primario solar, afectando de este modo al posterior funcionamiento de la instalación.

Caso 1: Vaso de expansión situado aguas arriba de la bomba y válvula antirretorno.

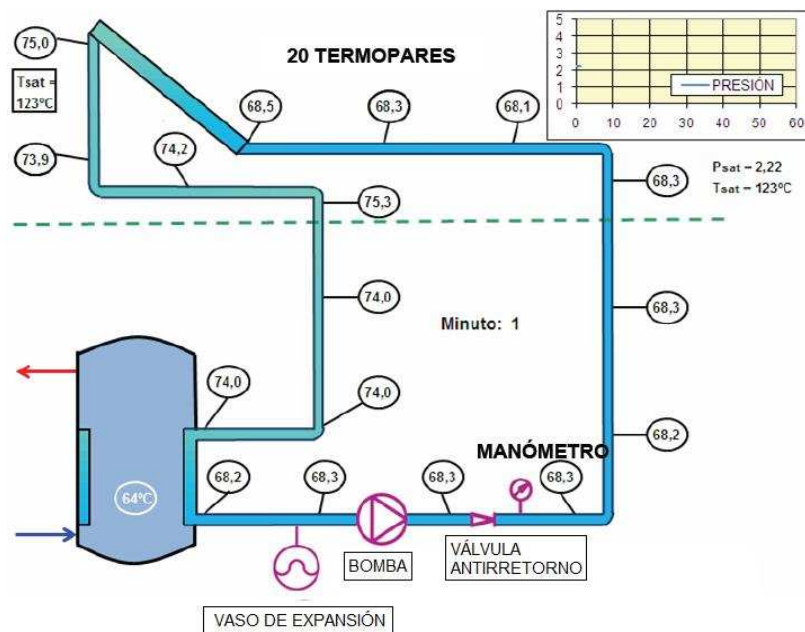
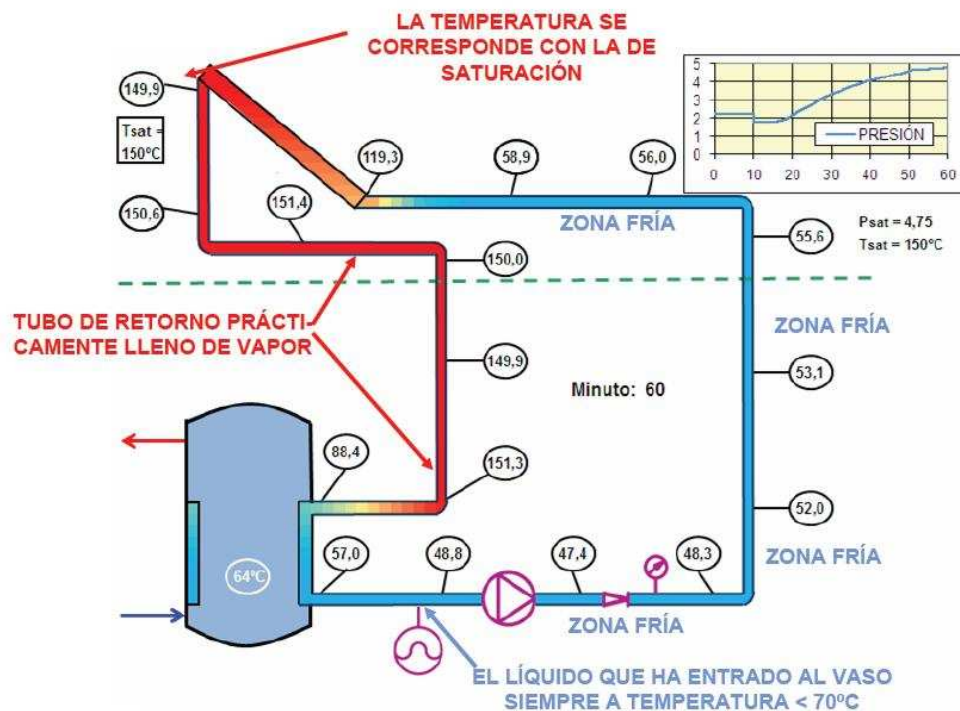


Figura 3.2: Estado de la instalación en el primer minuto del experimento. Fuente: Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT)

Resultados del experimento:

Con la bomba parada por la ausencia de demanda de ACS y el no requerimiento de la aportación solar al tanque de almacenamiento, el agua se empieza a calentar a medida que lo hacen los paneles solares cuando la radiación solar incide en ellos. La radiación incidente es de 1000 W/m^2 (radiación fácilmente alcanzable en horas de máxima radiación en verano) en cuestión de minutos se alcanzan temperaturas cercanas a los 100°C , y a medida que aumenta el tiempo sigue aumentando la temperatura de todo el circuito primario. En el captador se forma vapor, en la salida el agua también se evapora desplazando el resto de agua hacia el vaso de expansión (no hacia el otro lado debido a la presencia de la válvula antirretorno). La función del depósito de expansión es absorber la variación de volumen producida por el calentamiento del agua (ya que se dilata) absorbiendo el aumento de presión del circuito. Por ello, el vaso de expansión a medida que el agua se calienta se va llenando y aumentando su presión. Eso sí, hay que destacar que debido a la presencia aguas arriba de la válvula antirretorno el fluido sólo llega por el retorno de los paneles. La zona de mayor calentamiento será la del circuito de retorno de los paneles, mientras que la otra zona se mantendrá fría.

En el siguiente gráfico se muestra la evolución de los parámetros cuando la bomba está off.

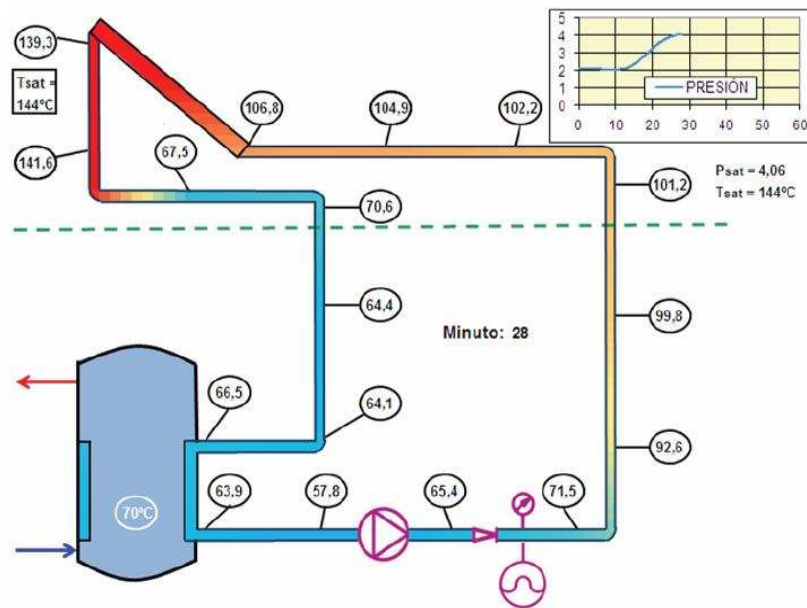


Después de una hora de ensayo, el resultado que se obtiene es el mostrado en la figura. La tubería de retorno está llena de vapor y el vaso de expansión alcanza una presión próxima a los 4,8 bares, mientras que el manómetro, aguas abajo de la bomba, se registra una presión de 5,4 bar, de modo que: LA BOMBA NO PUEDE ARRANCAR.

La bomba no podrá arrancar hasta que la zona roja se haga más pequeña, es decir, el retorno debe bajar su temperatura para que baje la presión aguas arriba de la bomba.

Destacar que el vaso de expansión siempre debe ser dimensionado para poder superar la cota de metros existente entre el sótano (lugar donde se encuentra el interacumulador, la bomba y el vaso de expansión) y el tejado (ubicación de los paneles solares).

Caso 2: Vaso de expansión situado aguas abajo de la bomba y la válvula antirretorno.



En este caso, al pararse la bomba por requerimiento del sistema de regulación, el fluido comienza a calentarse de igual modo que en el caso 1, aunque en este caso, la colocación del vaso de expansión aguas abajo de la bomba y de la válvula antirretorno permite que le llegue fluido de ambos lados (impulsión y retorno). El vapor se forma mayormente en la zona de los paneles, pero la tubería de impulsión se va calentando hasta que empieza a entrar agua en el vaso de expansión para equilibrar la dilatación del fluido, haciendo que de este modo comience a descender la temperatura de la tubería de impulsión.

Después de una hora de ensayo la presión alcanzada en el vaso de expansión es de 4 bar. Por tanto, LA BOMBA SI PUEDE ARRANCAR.

Con todo esto, se concluye que el diseño y colocación del conjunto: vaso de expansión, válvula antirretorno y bomba de circulación, es de vital importancia para evitar posibles fallos de funcionamiento y deterioros en la instalación solar.

SOLUCIONES TÍPICAS AL SOBRECALENTAMIENTO:

- ✓ La instalación de un aerotermo adecuado garantiza que la temperatura del fluido de trabajo nunca alcance la temperatura de estancamiento.
- ✓ Posibilidad de una cortina automática para tapar los paneles en caso de que estos alcancen una temperatura muy elevada.
- ✓ Sobredimensionar el vaso de expansión.

3.6.8 SISTEMAS DE PURGA

El sistema de purga se instalará en el punto más alto del campo de colectores siendo su función la evacuación de gases, constituidos por purgadores automáticos. Los purgadores que conforman el sistema de purga serán automáticos y estarán constituidos por una válvula de esfera y un botellín de desaireación, cuyo volumen útil se calcula a razón de $15 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ de batería. Es decir el volumen útil será de $11.4 \text{ m}^2 \cdot 15 \text{ cm}^3/\text{m}^2 = 171 \text{ cm}^3$.

3.7 SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE ACS

El sistema de control de la producción de ACS está formado por una centralita de regulación programable. Esta centralita actuará sobre las válvulas, sobre las bombas y sobre la caldera determinando su funcionamiento según los valores que se recogen en los sensores de medición y según la programación que se haya realizado al controlador. Es de vital importancia una buena colocación de los sensores para obtener medidas reales y así hacer que el sistema responda de la manera más eficiente posible.

Una de las claves para optimizar la eficiencia de la producción solar a parte de un correcto diseño y puesta en marcha de la instalación está en la programación, ya que por mucha energía que el sistema solar sea capaz de captar, si posteriormente por una mala programación no se puede emplear para evitar el funcionamiento de la caldera de apoyo, no habrá servido de mucho.

A continuación se muestran algunos parámetros básicos de la programación para la producción de ACS con apoyo solar en la instalación de Pontevedra.

➤ Descripción de las consignas de funcionamiento del circuito primario solar

El control de la bomba del circuito primario solar se realiza en función del salto de temperaturas entre la salida de los paneles solares y la temperatura menor del depósito solar (sensor de temperatura en la parte baja del depósito solar). Así, cuando $\Delta T \geq 6 \text{ }^\circ\text{C}$ se da la orden de poner la bomba en estado ON. La orden de parada le llega a la bomba cuando se llegue a un salto de temperaturas de $\Delta T = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ entre el depósito solar y la temperatura del fluido de trabajo en la salida de los paneles.

La caldera de apoyo sólo se encenderá cuando por motivos estacionales o climatológicos en el depósito de ACS no se llegue a la temperatura adecuada para consumo, $T_{cons} = 60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Se admite cierta histéresis para no encender la caldera de forma continua por pequeñas bajadas de temperatura en el depósito. Esta temperatura se podrá regular en función de la estación del año en que nos encontremos, pudiéndola bajar varios grados en verano por no necesitar una temperatura tan elevada con la ventaja de hacer trabajar menos a la caldera.

Para evitar un posible congelamiento del agua que circula por los paneles cuando la temperatura exterior es muy baja, se instala un termostato con función antihielo con consigna de temperatura $T_{fluido_panel} \leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para que el regulador de la orden de marcha a la bomba del circuito primario solar y a la del secundario para que haya un intercambio de calor entre el fluido de los paneles y el del acumulador solar hasta que el fluido alcance una temperatura de 5°C.

CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR PARA ACS Y CALEFACCIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

El sistema de calefacción por energía solar se define como aquel que emplea la radiación solar como fuente de energía para calentar un determinado ambiente. Aprovechando la instalación solar realizada para ACS se pueden introducir elementos adicionales para aprovechar el calor solar como apoyo a la calefacción y reducir de este modo el trabajo de la caldera y con ello las emisiones de CO₂ a la atmósfera. En el estudio que se va a realizar para el dimensionamiento del área de colectores necesarios para calefacción sólo se tendrá en cuenta en un primer cálculo la demanda energética estimada de calefacción, que será función de las cargas térmicas existente en el bloque de viviendas, para así calcular el área que se debería instalar para atender exclusivamente la demanda de calefacción y analizar a posteriori como afecta dicho dimensionamiento al comportamiento de la instalación de ACS, ya que el RITE limita la producción solar para no desperdiciar energía en verano en donde sólo existe demanda de ACS.

La configuración de la calefacción con el ACS podrá realizarse mediante acumulación independiente o compartida. Esto dependerá del estudio de dimensionamiento requerido para dar cobertura solar a la calefacción, ya que en función de los resultados que se obtengan se optará por la mejor solución entre acumulación compartida, independiente o incluso prescindir de la acumulación para calefacción.

El sistema de calefacción para la distribución del calor generado que se estudiará para el proyecto de Pontevedra será el de suelo radiante, ya que estos sistemas demandan una temperatura del agua de unos 45°C, ideal para combinar con la producción solar, frente a otros sistemas como el de radiadores que la demandan a unos 70-80°C.

4.2 CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS DEL EDIFICIO

Para dimensionar la instalación de calefacción hace falta conocer la demanda de calefacción que se prevé tener. En primer lugar se deben establecer unas condiciones de diseño establecidas por el RITE que serán función de la localización y de las características constructivas de la edificación.

➤ *Condiciones interiores de diseño en invierno*

<i>ESTACIÓN</i>	<i>TEMPERATURA (°C)</i>	<i>HUMEDAD RELATIVA (%)</i>
<i>Invierno</i>	<i>23</i>	<i>50</i>

➤ *Condiciones exteriores para la carga térmica de diseño*

Las condiciones exteriores vienen definidas en las normas UNE 100001, UNE 100-002-88 y UNE 100014IN en donde recogen las condiciones de diseño frente a la temperatura seca, temperatura húmeda y grados día. Igual que para la instalación de ACS hay dos criterios de diseño de la instalación:

- *Cálculo de las necesidades medias mensuales*: Este estudio es el que nos interesa para dimensionar la instalación de los paneles solares y del resto de la instalación excepto la caldera pues estudia la demanda estimada que se prevé tener en el bloque de viviendas. Este estudio se realiza mediante el cálculo de las cargas térmicas totales del bloque de viviendas.
- *Cálculo de la Carga térmica de diseño*: Se estudia la máxima exigencia energética del edificio en las condiciones de temperatura más adversas, es decir, considerando la temperatura mínima de Pontevedra. Con este dato se dimensionará la caldera para calefacción.

A continuación se procede al cálculo de las cargas térmicas mensuales del edificio localizado en la ciudad de Pontevedra.

4.2.1 *CONDICIONES EXTERIORES DE TEMPERATURA*

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Tmed (°C)	11	12	14	16	18	20	22	23	20	17	14	12

Tabla 4.1: Temperaturas medias mensuales en la provincia de Pontevedra. Fuente Censolar

La instalación de calefacción sólo funcionará en los meses más fríos, con lo cual el cálculo de cargas térmicas se excluyen los meses de verano (Junio, Julio, Agosto y Septiembre).

4.2.2 *LOCALES CALEFACTADOS*

Otro aspecto importante a definir es el área de la vivienda que va a ser calefactada. En cada vivienda del bloque sólo se instalarán sistemas de calefacción en la planta baja (salón, cocina y baños) y en la primera planta (dormitorios y baños) quedando sin calefactar la cubierta, el garaje y los espacios de las plantas baja y primera que no son habitables (pasillos y el hueco de las escaleras). Los datos geométricos de las habitaciones pueden consultarse en la *tabla 1.1* del capítulo 1 del presente proyecto.

4.2.3 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS

La expresión general para el cálculo de la carga térmica en invierno es la siguiente:

Ecuación 1

$$Q_{TOTAL,inv} = Q_{transmisión} - Q_{iluminación} - Q_{personas} - Q_{equipos} - Q_{rad_solar} + Q_{renovación} + Q_{infiltraciones}$$

De todas estas cargas se desprecia la carga de radiación solar por considerar que el horario normal de calefacción en invierno suele estar programado a horas en las que el Sol todavía no ha salido (primeras horas de la mañana) o ya se ha puesto (últimas horas de la tarde y noche), asumiendo que al hacer esta estimación no se está teniendo en cuenta el efecto de la inercia térmica de los cerramientos exteriores en los que incide la radiación.

4.2.4 CARGA TÉRMICA DE TRANSMISIÓN

$$Q_{transmisión} = U \cdot A \cdot \Delta T_e$$

- U: Coeficiente global de transmisión de calor $\left[\frac{W}{K \cdot m^2}\right]$
- A: Superficie de cada uno de los cerramientos $[m^2]$
- ΔT_e : Diferencia de temperatura equivalente

En este apartado se procede al cálculo de las pérdidas de calor que tienen lugar en la edificación a través de muros, ventanas, puertas, paredes interiores, techos y suelos.

Para el cálculo del **coeficiente global de transmisión** de calor primeramente se definen los materiales de los que están compuestas las paredes, techos y ventanas así como sus espesores para calcular las resistencias térmicas de conducción de todos los elementos mediante la expresión;

$$R_{cond} = \frac{e}{K \cdot A} \left[\frac{K}{W}\right]$$

Además de la resistencia de conducción también interviene las resistencias de convección debido al contacto del cerramiento con el aire exterior y el aire interior.

En el *Documento Básico HE Ahorro de Energía (tabla E.1)* vienen definidas las resistencias térmicas de convección de cerramientos en contacto con el exterior.

Posición del cerramiento	Rse $[m^2K/W]$	Rsi $[m^2K/W]$
Cerramientos verticales	0,04	0,13
Cerramientos horizontales con flujo ascendente	0,04	0,1

A continuación se describe brevemente la composición de algunos cerramientos de las viviendas:

○ *Composición de las paredes exteriores*

Material	Espesor [cm]	K [W/m°C]
Revestimiento de mortero de cemento	2,5	1,4
Ladrillo perforado	11,5	0,76
Pantalla antivapor de aluminio	0,5	240
Aislante, lana de vidrio	5	0,033
Ladrillo hueco doble	6	0,49
Revestimiento de mortero de cemento	2,5	1,4
Enlucido de yeso	2	0,3

○ *Composición del techo*

Material	Espesor [m]	K [W/m°C]
Pavimento (hormigón con áridos)	0,05	1,16
Bovedilla hormigón normal	0,25	0,18
Poliestireno expandido (tipo V)	0,06	0,033
Guarnecido de yeso	0,02	0,02

○ *Composición del suelo*

Se emplea una composición similar a la del techo, pero teniendo en cuenta que está instalado el sistema de calefacción por suelo radiante y el material del suelo dependerá de la habitación estudiada, siendo parquet para las habitaciones y terrazo para la cocina.

○ *Composición de las ventanas*

Se emplearán ventanas con doble acristalamiento con carpintería metálica y espesor nominal de la cámara de aire de 9 mm. El valor de las conductividades térmicas se obtiene del CTE.

○ *Composición de puertas*

Se emplearán puertas de madera sin acristalado. En función de si la pared da a un local no calefactado o hacia el exterior se considerarán dos conductividades térmicas diferentes.

Para el cálculo del término ΔT_e hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cerramiento en contacto con un local acondicionado:

$$\Delta T_e = T_{\text{diseño}} - T_{\text{local}_2}$$

- Cerramiento en contacto con un local no acondicionado:

$$\Delta T_e = T_{\text{diseño}} - \frac{T_{\text{ext}} + T_{\text{diseño}}}{2}$$

- Cerramiento en contacto con el exterior: Se calcula mediante correcciones tabuladas basadas en la hora solar y la orientación del cerramiento a estudiar.

$$\Delta T_e = \Delta T_{e_{\text{tabla}}} + a$$

En donde a es un parámetro de corrección en función de la oscilación media diaria de temperatura y la diferencia de temperaturas entre la de diseño y la exterior.

4.2.4.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la tabla 4.3 con los resultados obtenidos del cálculo de las cargas térmicas por transmisión en el bloque de viviendas.

		PLANTA 1							
		CARGAS TÉRMICAS CONDUCCIÓN (KW)							
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
	VIVIENDAS								
BLOQUE 1	1	667	607	485	364	243	303	485	607
	3	500	455	364	273	182	227	364	455
	5	503	457	366	274	183	229	366	457
	7	503	457	366	274	183	229	366	457
	9	503	457	366	274	183	229	366	457
	11	472	429	343	257	171	214	343	429
	13	500	455	364	273	182	227	364	455
TOTAL /BLOQUE	KW	3,65	3,32	2,65	1,99	1,33	1,66	2,65	3,32

Tabla 4.2: Cargas térmicas por vivienda de los cerramientos verticales de toda la planta 1.

	CARGAS TÉRMICAS CONDUCCIÓN (KW)							
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Q conducción TOTAL (KW)	5,55	5,04	4,03	3,02	2,02	2,52	4,03	5,04

4.2.5 CARGA TÉRMICA DE VENTILACIÓN

Normalmente todas las viviendas suelen ventilarse para evitar que se cargue y vicie el ambiente renovando para ello el aire interior. La carga de renovación del aire se calcula como la cantidad de aire necesaria para llevar la temperatura del aire exterior que entra a la temperatura interior.

La carga de ventilación tiene una componente sensible que es función de la diferencia de temperaturas existente entre el exterior y el interior y otra componente latente que es función de la diferencia de humedad entre el aire interior y exterior.

La expresión para el cálculo de esta carga es la siguiente:

$$Q_{\text{ventilación}} = Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{latente}}$$

$$Q_{\text{sensible}} = V_{\text{vent}} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{\text{diseño}} - T_{\text{ext}})$$

$$Q_{\text{latente}} = V_{\text{vent}} \cdot \rho \cdot h_{fg} \cdot (w_{\text{int}} - w_{\text{ext}})$$

Para resolver la ecuación del calor latente se ha empleado el diagrama psicrométrico empleando los datos de humedades relativas medias proporcionados por CENSOLAR.

El caudal de ventilación es un dato que se ha obtenido de la norma UNE que regula la calidad del aire, seleccionando una tasa de aire exterior por persona correspondiente a la categoría IDA 2 y tomando un valor medio entre los valores dados para zona de fumadores y zona de no fumadores.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

CARGAS TÉRMICAS VENTILACIÓN/ BLOQUE (KW)								
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Qvent_sensible	7,82	6,85	5,47	3,80	2,25	3,03	5,22	7,03

V_ventilación (l/s*pers)	Cp_medio (J/kg*K)	1/Dens	Factor simult.	Tdiseño	Personas/ bloque
20	1024	1,176	0,75	22	42

Tabla 4.4: Carga sensible de renovación del aire

CARGAS LATENTES / BLOQUE (KW)								
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Qvent_latente	6,49	6,12	5,56	3,71	1,48	1,30	3,71	6,12
wext (g/kg)	6,5	6,7	7	8	9,2	9,3	8	6,7
wint (g/kg)	10	10	10	10	10	10	10	10
HR	74	73	69	67	68	72	73	74

Tabla 4.5: Carga latente de renovación del aire

4.2.6 CARGA TÉRMICA POR INFILTRACIONES

Estas cargas se deben a la entrada de aire en las viviendas a través de rendijas de puertas, ventana y en general cualquier rendija. Existen procedimientos de cálculo del volumen de aire que puede entrar debido a las infiltraciones, pero es un cálculo muy engorroso por lo que se suele emplear siempre un porcentaje de la suma de las cargas de renovación y más las de transmisión.

CARGA TÉRMICA INFILTRACIÓN/ BLOQUE (KW)								
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Q infiltraciones	1,56	1,37	1,09	0,76	0,45	0,61	1,04	1,41

Tabla 4.6: Carga térmica por infiltraciones

4.2.7 CARGAS TÉRMICAS INTERNAS

A este grupo pertenecen las cargas de las personas (calor latente y calor sensible), las cargas de iluminación y las cargas de los equipos eléctricos que disipan calor cuando están en funcionamiento.

➤ Carga térmica por iluminación

Se estipula que la carga por iluminación tiene un ratio de unos 20 W/m². En el siguiente cuadro se muestran las medidas de las principales áreas de cada vivienda. Decir que el bloque se compone de un total de 7 viviendas, siendo todas muy parecidas y habiendo 4 tipos de viviendas diferentes.

			Vivienda 1	Vivienda 3	Vivienda 2	Vivienda 4
Qilum [W/m ²]	m ² /viv.	Salón	26,5	27,8	27	28
		Cocina	15	15,5	14,2	14,8
		Dormitorios	41,5	43,3	41,2	42,8
		TOTAL	83	86,6	82,4	85,6

A partir de estos datos se estima un área media de las zonas de las viviendas que van a ser calefactadas y se calcula el valor de la carga de iluminación que se considerará constante a lo largo de todo el año.

Qiluminación [W]	1688
-----------------------------	-------------

Tabla 4.7: Carga térmica de iluminación

➤ *Carga térmica de personas.*

Al igual que en el caso de la carga de ventilación, existe una componente correspondiente a la **carga sensible** (debida a la disipación de calor por conducción, convección y radiación) y otra a la **carga latente** (debido al sudor que provoca la evaporación del agua)

CARGAS TÉRMICAS PERSONAS/ BLOQUE (KW)								
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Qpersonas (sensible)	2,205	2,205	2,205	2,205	2,205	2,205	2,205	2,205
Qpersonas (latente)	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89

Npersonas /vivienda	Nviv	Qsensible [W]	Qlatente [W]	Factor simult.
6	7	70	60	0,75

Tabla 4.8: Carga térmica de los ocupantes

4.2.8 RESUMEN DE LOS RESULTADOS

CARGAS SENSIBLES/bloque (KW)								
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Q Conducción	9,43	8,57	6,86	5,14	3,43	4,29	6,86	8,57
Q Interna	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89	3,89
Q Vent_sensible	7,82	6,85	5,47	3,80	2,25	3,03	5,22	7,03
Q Infiltraciones	1,56	1,37	1,09	0,76	0,45	0,61	1,04	1,41
Q TOTAL_Sensible	18,81	16,79	13,42	9,70	6,12	7,92	13,12	17,01

Tabla 4.9: Resultados de las Cargas Sensibles

CARGAS LATENTES/bloque (KW)								
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Q_Ocupantes	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
Q_Vent_latente	6,49	6,12	5,56	3,71	1,48	1,30	3,71	6,12
Q_Total_Latente	4,60	4,23	3,67	1,82	-0,41	-0,59	1,82	4,23

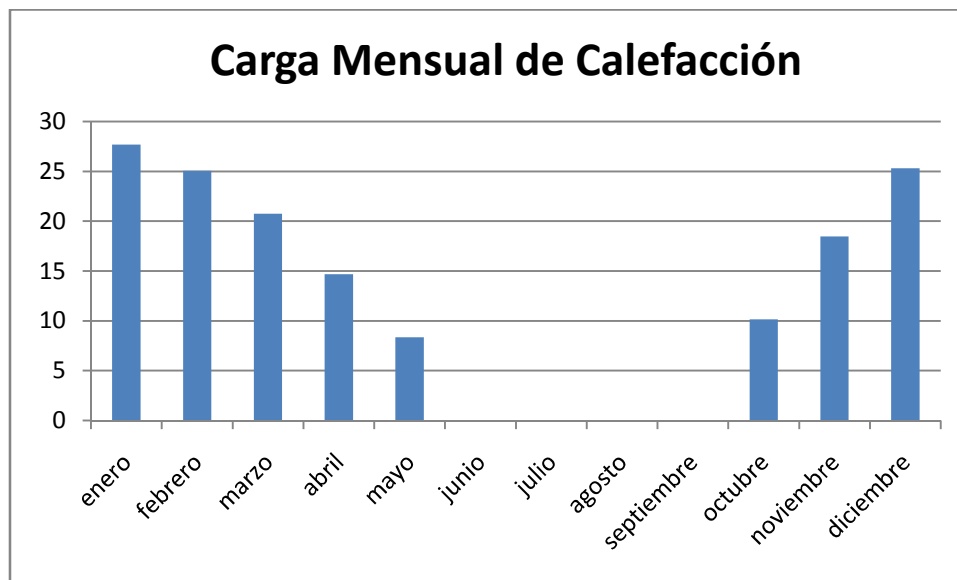
Tabla 4.10: Resultados de las Cargas Latentes.

CARGAS TOTALES/bloque (INVIERNO)								
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
KW	27,69	25,06	20,74	14,66	8,35	10,16	18,46	25,30

Coeficientes	
Instalación	Seguridad
6%	5%

Tabla 4.10: Resultados de las **CARGAS TOTALES**

Y representado de forma gráfica:



Gráfica 4.1: Demanda mensual de calefacción en KW.

4.3 *INSTALACIÓN PARA CALEFACCIÓN*

En este apartado nos centraremos especialmente dos puntos:

1. Diseño del sistema de calefacción por suelo radiante
2. Cálculo del área de colectores necesaria para suplir la demanda de calefacción imponiendo que siga cumpliendo los requisitos exigidos por el RITE para la producción de ACS, por lo que hay que tener especial cuidado en no sobredimensionar la instalación ya que en verano se podría desperdiciar más energía que la permitida.

4.3.1 *DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE*

Para el diseño de la instalación de suelo radiante se ha empleado documentación técnica indicada en las referencias. Como ya se ha comentado anteriormente en la introducción del capítulo se ha escogido el suelo radiante como sistema de distribución principalmente por el requerimiento de una temperatura de impulsión mucho más baja que otros sistemas convencionales como los radiadores que requieren una temperatura del agua de impulsión de unos 80°C frente a los 40-45°C que requiere el suelo radiante. A parte del ahorro energético que supone también nos permite emplear una caldera de condensación, que aunque son más caras son de mayor calidad.

El sistema de producción impulsará el agua a una temperatura constante independientemente de la temperatura interna de cada local que será calefactado. El sistema trabaja a temperatura constante con caudal variable para adecuarse a la demanda.

Las condiciones previas que hay que definir son:

- 1) La **temperatura de impulsión**, que es la temperatura a la que hay que producir el agua para su distribución posterior.
- 2) El **flujo calorífico** aportado a los interiores: suele estar comprendido entre 50 y 100 W/m²
- 3) La **temperatura máxima recomendable de la superficie pisable**, que será función del tipo de local y material con que esté hecho el suelo.

4.3.1.1 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

El diseño del circuito de tuberías será función del área a calefactar. En principio se requerirá un circuito por habitación, salvo habitaciones muy grandes que posiblemente necesiten dos circuitos. Los circuitos parten de unos colectores que están conectados con la caldera de baja temperatura para la calefacción cuya función es la distribución del caudal necesario de agua caliente en función de la demanda.

En el diseño a realizar en el bloque de viviendas se emplearán dos colectores de distribución por vivienda, un por planta calefactada, lo que hace un total de 14 colectores de distribución de los que parten las tuberías.

4.3.1.2 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS

Cada habitación a calefactar tendrá un circuito independiente para así poder controlar su demanda por separado.

La longitud de cada circuito se determina a partir de la siguiente expresión obtenida a partir de los manuales de dimensionamiento de la casa Wirsbo:

$$L = \frac{A}{e} + 2 \cdot l$$

En donde;

- A : Área de la habitación a calefactar [m2]
- e : Distancia entre tubos del serpentín de suelo radiante, generalmente 0,2 m
- l : Distancia hasta el colector de donde parten los circuitos.

	ÁREAS						
VIVIENDAS	COCINA [m2]	SALÓN [m2]	DORMITORIOS [m2]				TOTAL (m2)
			A	B	C	D	
1	14,97	26,54	10,08	8,71	7,71	14,09	82,10
3	15,57	27,8	10,08	9,30	7,71	14,78	85,24
5	15,57	27,8	10,08	9,30	7,71	14,78	85,24
7	15,57	27,8	10,08	9,30	7,71	14,78	85,24
9	15,57	27,8	10,08	9,30	7,71	14,78	85,24
11	15,57	27,8	10,08	9,30	7,71	14,78	85,24
13	14,97	26,54	10,08	8,71	7,71	14,09	82,10

Tabla 4.11: Áreas de las habitaciones con sistema de suelo radiante.

Longitud del circuito de suelo radiante

		Área (m2)	Nº circuitos	e	L_colector		N colect	Long_circuito (m)	Num circ	Mat. Suelo
Vivienda 1	COCINA	14,97	1	0,2	Altura 0-1	Altura 1-2	2,3 Colector	79,45	1	Terrazo
	SALÓN	26,54	2		2,3	2,5	5,8	144,3	2	parquet
	DORM_A	10,08	1				4,8 Colector	60	1	parquet
	DORM_B	8,71	1				2,3	48,15	1	parquet
	DORM_C	7,71	1				10,8	60,153	1	parquet
	DORM_D	14,09	1				9,3	89,064	1	parquet

Vivienda 3	COCINA	15,57	1	0,2			2,3 Colector	82,45		
	SALÓN	27,8	2				5,8	150,6		
	DORM_A	10,08	1				2,3 Colector	55		
	DORM_B	9,30	1				4,8	56,075		
	DORM_C	7,71	1				8,3	55,153		
	DORM_D	14,78	1				11,8	97,52		

Vivienda 5	COCINA	15,57	1	0,2			2,3 Colector	82,45		
	SALÓN	27,8	2				5,8	150,6		
	DORM_A	10,08	1				4,8 Colector	60		
	DORM_B	9,295	1				2,3	51,075		
	DORM_C	7,7106	1				10,8	60,153		
	DORM_D	14,784	1				9,3	92,52		

Vivienda 7	COCINA	15,57	1	0,2			2,3 Colector	82,45		
	SALÓN	27,8	2				5,8	150,6		
	DORM_A	10,08	1				2,3 Colector	55		
	DORM_B	9,295	1				4,8	56,075		
	DORM_C	7,7106	1				8,3	55,153		
	DORM_D	14,784	1				11,8	97,52		

Vivienda 9	COCINA	15,57	1	0,2			2,3 Colector	82,45		
	SALÓN	27,8	2				5,8	150,6		
	DORM_A	10,08	1				4,8 Colector	60		
	DORM_B	9,295	1				2,3	51,075		
	DORM_C	7,7106	1				10,8	60,153		
	DORM_D	14,784	1				9,3	92,52		

Vivienda 11	COCINA	15,57	1	0,2			2,3 Colector	82,45		
	SALÓN	27,8	2				5,8	150,6		
	DORM_A	10,08	1				4,8 Colector	60		
	DORM_B	9,295	1				7,3	61,075		
	DORM_C	7,7106	1				10,8	60,153		
	DORM_D	14,784	1				14,3	102,52		

Vivienda 13	COCINA	15,57	1	0,2			2,3 Colector	82,45		
	SALÓN	27,8	2				5,8	150,6		
	DORM_A	10,08	1				7,3 Colector	65		
	DORM_B	9,295	1				4,8	56,075		
	DORM_C	7,7106	1				13,3	65,153		
	DORM_D	14,784	1				11,8	97,52		

Tabla 4.12: Longitud de los circuitos de suelo radiante por vivienda y habitación.

4.3.1.3 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

En este apartado se calcularán los parámetros de funcionamiento del sistema de suelo radiante como lo son las temperaturas de impulsión, de retorno y del suelo, y el caudal de agua que circula por los circuitos.

A continuación se explica cómo se calculan dichas variables:

➤ *Cálculo de las temperaturas*

Para el cálculo de las temperaturas se emplean el manual de suelo radiante de la casa WIRSBO en el cual se muestran gráficas que determinan dicho salto en función de la demanda de calor por unidad de área a calefactar y las características del suelo (rugoso, liso, material de recubrimiento, espesor...)

La temperatura de impulsión se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$T_{imp} = T_{diseño} + \Delta T_{suelo-ambiente} + \Delta T_{imp-suelo}$$

Y para la temperatura de retorno se estima un salto de temperatura de 10°C.

- $\Delta T_{suelo-ambiente}$: Este salto térmico se calcula a partir de la demanda de calor por unidad de área (Q [W/m^2]).

La demanda de calor por unidad de área, q , se estimará considerando homogénea la distribución de calor por área, así se podrá calcular el salto térmico entre el suelo y el ambiente en función de q de forma mensual y no por habitáculo.

- $\Delta T_{imp-suelo}$: El salto de temperaturas entre la impulsión y el suelo se calcula gráficamente teniendo en cuenta el material del que está formado el suelo.

➤ *Cálculo del caudal de agua*

La expresión a emplear es la siguiente:

$$Q = m_{agua} \cdot C_p \cdot (T_{imp} - T_{ret})$$

Los resultados se muestran a continuación

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Q (W/m2) por vivienda		46,90	42,45	35,13	24,84	14,15	17,21	31,27	42,86
ΔT (suelo-ambiente)		4,5	4,1	3,8	2,8	1,7	2	2,7	4
Tsuelo (°C)		26,5	26,1	25,8	24,8	23,7	24	24,7	26
ΔT (impulsión-suelo)		13	12	11,6	10,5	9	9,2	11	12,2
Timp agua (°C)		39,5	38,1	37,4	35,3	32,7	33,2	35,7	38,2
Tret agua (°C)		29,5	28,1	27,4	25,3	22,7	23,2	25,7	28,2
magua (l/s) por Bloque		0,662	0,600	0,496	0,351	0,200	0,243	0,442	0,605
q (W) Vivienda 1	COCINA	702,06	635,48	525,87	371,82	211,82	257,59	468,06	641,59
	SALÓN	1244,68	1126,63	932,30	659,19	375,53	456,68	829,82	1137,46
	DORM_A	472,73	427,90	354,09	250,36	142,63	173,45	315,17	432,01
	DORM_B	408,48	369,74	305,97	216,34	123,24	149,88	272,33	373,30
	DORM_C	361,61	327,32	270,86	191,51	109,10	132,68	241,09	330,46
	DORM_D	660,93	598,24	495,06	350,03	199,41	242,50	440,64	604,00
magua (l/s) por viv.		0,09	0,08	0,07	0,05	0,03	0,03	0,06	0,08
q (W) Vivienda 3	COCINA	730,20	660,95	546,95	386,72	220,31	267,92	486,82	667,31
	SALÓN	1303,77	1180,12	976,57	690,49	393,35	478,36	869,22	1191,46
	DORM_A	472,73	427,90	354,09	250,36	142,63	173,45	315,17	432,01
	DORM_B	435,92	394,58	326,52	230,87	131,52	159,94	290,62	398,37
	DORM_C	361,61	327,32	270,86	191,51	109,10	132,68	241,09	330,46
	DORM_D	693,34	627,59	519,34	367,20	209,19	254,39	462,25	633,62
magua (l/s)		0,10	0,09	0,07	0,05	0,03	0,04	0,06	0,09
q (W) Vivienda 5	COCINA	730,20	660,95	546,95	386,72	220,31	267,92	486,82	667,31
	SALÓN	1303,77	1180,12	976,57	690,49	393,35	478,36	869,22	1191,46
	DORM_A	472,73	427,90	354,09	250,36	142,63	173,45	315,17	432,01
	DORM_B	435,92	394,58	326,52	230,87	131,52	159,94	290,62	398,37
	DORM_C	361,61	327,32	270,86	191,51	109,10	132,68	241,09	330,46
	DORM_D	693,34	627,59	519,34	367,20	209,19	254,39	462,25	633,62
magua (l/s)		0,10	0,09	0,07	0,05	0,03	0,04	0,06	0,09
q (W) Vivienda 7	COCINA	730,20	660,95	546,95	386,72	220,31	267,92	486,82	667,31
	SALÓN	1303,77	1180,12	976,57	690,49	393,35	478,36	869,22	1191,46
	DORM_A	472,73	427,90	354,09	250,36	142,63	173,45	315,17	432,01
	DORM_B	435,92	394,58	326,52	230,87	131,52	159,94	290,62	398,37
	DORM_C	361,61	327,32	270,86	191,51	109,10	132,68	241,09	330,46
	DORM_D	693,34	627,59	519,34	367,20	209,19	254,39	462,25	633,62
magua (l/s)		0,10	0,09	0,07	0,05	0,03	0,04	0,06	0,09
q (W) Vivienda 9	COCINA	730,20	660,95	546,95	386,72	220,31	267,92	486,82	667,31
	SALÓN	1303,77	1180,12	976,57	690,49	393,35	478,36	869,22	1191,46
	DORM_A	472,73	427,90	354,09	250,36	142,63	173,45	315,17	432,01
	DORM_B	435,92	394,58	326,52	230,87	131,52	159,94	290,62	398,37
	DORM_C	361,61	327,32	270,86	191,51	109,10	132,68	241,09	330,46
	DORM_D	693,34	627,59	519,34	367,20	209,19	254,39	462,25	633,62
magua (l/s)		0,10	0,09	0,07	0,05	0,03	0,04	0,06	0,09
q (W) Vivienda 11	COCINA	730,20	660,95	546,95	386,72	220,31	267,92	486,82	667,31
	SALÓN	1303,77	1180,12	976,57	690,49	393,35	478,36	869,22	1191,46
	DORM_A	472,73	427,90	354,09	250,36	142,63	173,45	315,17	432,01
	DORM_B	435,92	394,58	326,52	230,87	131,52	159,94	290,62	398,37
	DORM_C	361,61	327,32	270,86	191,51	109,10	132,68	241,09	330,46
	DORM_D	693,34	627,59	519,34	367,20	209,19	254,39	462,25	633,62
magua (l/s)		0,10	0,09	0,07	0,05	0,03	0,04	0,06	0,09
q (W) Vivienda 13	COCINA	730,20	660,95	546,95	386,72	220,31	267,92	486,82	667,31
	SALÓN	1303,77	1180,12	976,57	690,49	393,35	478,36	869,22	1191,46
	DORM_A	472,73	427,90	354,09	250,36	142,63	173,45	315,17	432,01
	DORM_B	435,92	394,58	326,52	230,87	131,52	159,94	290,62	398,37
	DORM_C	361,61	327,32	270,86	191,51	109,10	132,68	241,09	330,46
	DORM_D	693,34	627,59	519,34	367,20	209,19	254,39	462,25	633,62
magua (l/s)		0,09	0,08	0,07	0,05	0,03	0,03	0,06	0,08

Tabla 4.13: Variables: caudal de agua, temperaturas de impulsión y retorno, flujo térmico por metro cuadrado, que caracterizan el funcionamiento del suelo radiante.

4.3.1.4 CÁLCULO DE LAS TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN

Para el cálculo de la red de tuberías se emplea el catálogo de *UPONOR Wirsbo* y en función del caudal que circula por cada vivienda y del caudal total que tiene que distribuir el sistema se dimensiona la red de tuberías.

Para el **circuito primario** encargado de toda la distribución del agua calentada hacia los colectores de cada vivienda se escoge a partir de los catálogos proporcionados por *UPONOR Wirsbo-evalPEX* unas tuberías de **dimensión 40x3,7** con $D_{ext} = 40 \text{ mm}$ y $D_{int} = 32,6 \text{ mm}$

Para el **circuito secundario** de distribución de cada vivienda se escogen unas tuberías de **dimensión 20x2** con $D_{ext} = 20 \text{ mm}$ y $D_{int} = 16 \text{ mm}$

4.3.1.5 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA Y SELECCIÓN DE LAS BOMBAS DE CIRCULACIÓN

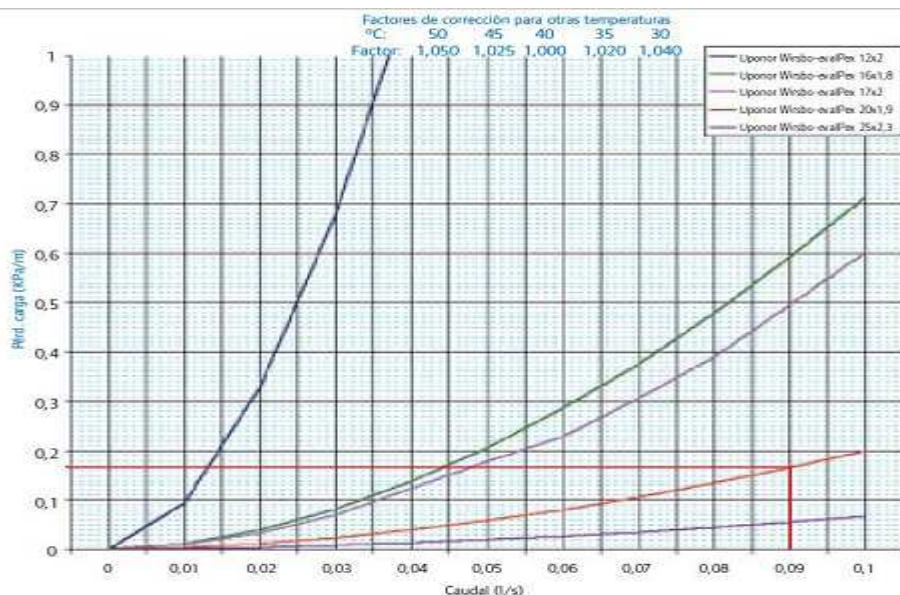
En este punto se calculan las pérdidas de carga de todo el sistema de calefacción (a partir de gráficas obtenidas de la *referencia (7)*, para la posterior elección de las bombas adecuadas para la impulsión y circulación del agua. Estos cálculos se realizarán para los principales componentes del sistema de calefacción.

En primer lugar se muestran las pérdidas de carga que tienen lugar en el sistema de distribución del suelo radiante y del circuito secundario de las calderas.

Los resultados que se han obtenido se muestran en la tabla 4.14:

PÉRDIDA DE CARGA EN LOS CONDUCTOS										
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Red Distribución (tubo 40*3,7)	magua (l/s) por Bloque		0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0,2	0,4	0,6
	Pérdida de carga (KPa/m)		0,19	0,18	0,16	0,1	0,025	0,025	0,1	0,18
	Longitud (m)	94,8	18,01	17,06	15,17	9,48	2,37	2,37	9,48	17,06
Red circuito suelo radiante (tubo 20*2)	magua (l/s) por vivienda		0,09	0,08	0,07	0,05	0,03	0,03	0,06	0,08
	Perdida carga (KPa/m)		0,16	0,14	0,10	0,05	0,02	0,02	0,08	0,14
	COCINA	79,45	12,71	11,12	7,95	3,97	1,59	1,59	6,36	11,12
	SALÓN	72,15	11,54	10,10	7,22	3,61	1,44	1,44	5,77	10,10
	DORM_A	60	9,60	8,40	6,00	3,00	1,20	1,20	4,80	8,40
	DORM_B	48,15	7,70	6,74	4,82	2,41	0,96	0,96	3,85	6,74
	DORM_C	60,153	9,62	8,42	6,02	3,01	1,20	1,20	4,81	8,42
	DORM_D	89,064	14,25	12,47	8,91	4,45	1,78	1,78	7,13	12,47

Tabla 4.14: Resultados de las pérdidas de carga en la red de circuitos que conforman el suelo radiante.



Gráfica 4.2: Curvas para el cálculo de la pérdida de carga en conductos. Fuente UPONOR

A continuación se resuelven las pérdidas que tienen lugar en todo el circuito de calefacción formado por: circuito primario de calderas (desde calderas hasta colector de calefacción), circuito de impulsión (desde colector de calefacción hasta colector de distribución de suelo radiante), circuito secundario de calderas (desde colector de calefacción hasta intercambiador de placas para calefacción), circuito de distribución general del suelo radiante y circuito de suelo radiante por cada habitación calefactada.

La expresión que se emplea para resolver las pérdidas de carga es la mostrada a continuación.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho Q^2}{A^2}$$

El procedimiento de cálculo es exactamente el mismo que el empleado para ACS, en función de la longitud del circuito primario, del diámetro de tuberías, del caudal y de la rugosidad se obtiene la pérdida de carga de los conductos a estudiar. Decir que para el caso de las pérdidas de carga de los conductos del suelo radiante se emplearán los valores proporcionados por el fabricante.

Por último comentar que para los circuitos de suelo radiante se ha dimensionado todas las bombas para el caso más desfavorable atendiendo a los parámetros de longitud y caudal de agua requerido. Debido a que las diferencias entre los distintos circuitos secundarios del suelo radiante que parten de los colectores de distribución es pequeña se acepta esta aproximación como válida.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

SELECCIÓN DE BOMBAS DE CALEFACCIÓN

	Circuito	Long (m)	DN (m)	Q (m ³ /s)	ΔP (kPa)	ΔH_p (m.c.a)	ΔH (m.c.a)	Pot. Bomba (W)
Suelo radiante	Red primaria	94,8	0,04	6,6E-04	18,01	1,84	0	47,7
	Red secundaria	150,6	0,02	9,2E-05	24,10	2,46	0	8,9
Circuito Calderas	Circ. Primario	10	0,04	1,0E-03	7,51	0,77	0	30,8
	Impulsión	99,6	0,04	1,0E-03	74,80	7,63	4,8	500,6

Tabla 4.15: Resultados de las pérdidas de carga y las potencias requeridas por las bombas principales del sistema de calefacción

4.3.2 CÁLCULO DEL ÁREA DE COLECTORES NECESARIA PARA SUPLIR LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN

En este punto se estudiará la posibilidad de aumentar el área a instalar de paneles solares para cubrir parte de la demanda de calefacción sin que por ello se incumplan los requisitos exigidos por la normativa para la producción solar de ACS.

Para realizar este estudio se procederá de un modo más sencillo que para el caso del ACS, sin tener que resolver el sistema de ecuaciones resultante de realizar balances de energía a cada componente.

Aprovechando el cálculo realizado en el capítulo 3 sobre las pérdidas de calor en el colector y en el resto de elementos de la instalación se puede resolver el sistema de forma más inmediata obteniendo la fracción solar conseguida para calefacción en pocos pasos ya que a partir de las pérdidas que se obtienen por colector se puede calcular el salto de temperaturas del fluido de trabajo (agua) y como la demanda de calefacción también es conocida simplemente falta despejar la fracción solar para calefacción.

Los cálculos se encuentran anexados en el capítulo de hojas de cálculo.

Se han realizado los cálculos para el dimensionamiento de 5, 10 y 15 colectores, estudiando la fracción solar que se obtiene en cada situación para analizar si realmente compensa hacer un sobredimensionado para calefacción o es mejor dimensionar la instalación para ACS y diseñar la instalación para que pueda existir apoyo solar para la calefacción cuando la demanda de ACS lo permita.

Los resultados que se han obtenido se muestran en las siguientes tablas:

Q calef [KW]	Qu (KW)		
	5	10	15
25,70	1,41	2,83	4,24
23,08	1,38	2,77	4,15
18,76	1,69	3,41	5,12
12,68	1,75	3,54	5,30
6,37	1,41	2,84	4,26
0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00
8,17	1,44	2,91	4,37
16,48	1,76	3,54	5,32
23,32	1,33	2,64	3,96

Tabla 4.16: Demanda de energía total mensual de calefacción y producción solar para 5, 10 y 15 colectores.

En la tabla 4.17 se estudian los dos sistemas de forma independiente. Si realmente se diseñase la instalación para que funcionasen de forma conjunta la **f global** cambiaría en todos los meses excepto en los de verano en donde no hay demanda de calefacción. Por este motivo sirve este método para evaluar si se puede o no aumentar el número de paneles solares.

	f_calef		
	Ncolectores		
	5	10	15
Enero	0,055	0,11	0,165
Febrero	0,06	0,12	0,18
Marzo	0,09	0,182	0,273
Abril	0,138	0,279	0,418
Mayo	0,221	0,446	0,669
Junio	0	0	0
Julio	0	0	0
Agosto	0	0	0
Septiembre	0	0	0
Octubre	0,176	0,356	0,534
Noviembre	0,107	0,215	0,323
Diciembre	0,057	0,113	0,17

	f_acs		
	Ncolectores		
	5	10	15
	0,12	0,23	0,33
	0,18	0,35	0,50
	0,34	0,63	0,88
	0,43	0,78	1,00
	0,46	0,82	1,00
	0,73	1,00	1,00
	1,00	1,00	1,00
	0,97	1,00	1,00
	0,48	0,86	1,00
	0,39	0,71	0,97
	0,18	0,34	0,48
	0,13	0,25	0,36

f_anual	0,090	0,182	0,273
---------	-------	-------	-------

0,358	0,577	0,772
-------	-------	-------

Tabla 4.17: Fracción solar mensual y anual para calefacción y para ACS para 5, 10 y 15 colectores

A la vista de los resultados se comprueba que la fracción solar conseguida para calefacción es bastante baja. Podría aumentarse el número de paneles hasta un total de 10, pues la fracción solar conseguida para ACS estaría dentro del rango exigido y no se excedería en más de 3 meses el 100% de la producción, ni en ningún mes se sobrepasa el 110%. Pese a esto, a la vista de los resultados obtenidos y debido a la poca contribución que supondría este aumento de paneles del apoyo solar a la calefacción se ha optado por no aumentar el área de colectores y dimensionar la instalación solar para ACS únicamente.

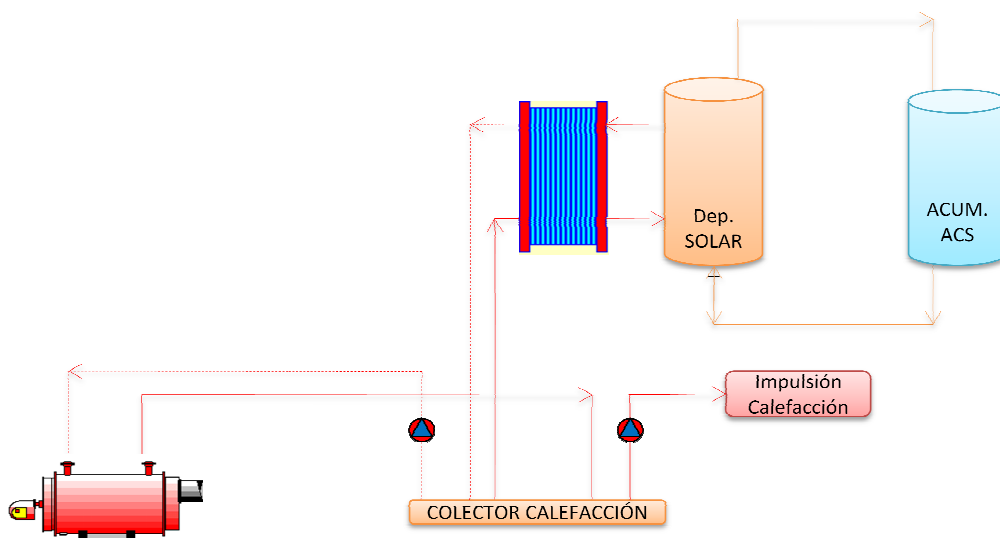
Pese a esto se incorporarán equipos al sistema hasta ahora diseñado para el suministro de ACS con el objetivo de apoyar la demanda de calefacción con producción solar en caso de que la demanda de ACS lo permita. Por tanto, se tendrá un sistema acoplado para suministro de ACS y calefacción con apoyo solar dimensionado para cumplir con las exigencias mínimas de contribución solar para ACS.

4.4 ACOPLAMIENTO DE LA INSTALACIÓN DE CALEFACCIÓN AL SISTEMA SOLAR

En este punto se va a desarrollar y a explicar el funcionamiento de la instalación solar para dar servicio de ACS y calefacción cuando la producción solar lo permita. Hay varias opciones disponibles para acoplar el sistema de ACS y el de calefacción con el sistema solar.

En este proyecto se ha optado por emplear el depósito de acumulación solar para apoyo de calefacción empleando para ello un intercambiador de placas entre el primario de la caldera de calefacción y el propio depósito.

Este sistema es la mejor opción, además, el hecho de tener dos depósitos de acumulación en serie, uno solar y otro de ACS, nos permite usar el agua del depósito solar y no la del depósito de ACS la cual será próxima a los 60°C para el suelo radiante en caso de ser posible. La configuración básica de esta parte de la instalación se muestra en el siguiente esquema de forma muy simplificada.



En el esquema representado se muestran los componentes de la instalación para poder emplear el agua calentada por el sol del depósito solar para cubrir parte de la demanda de calefacción.

Cuando el tanque solar no tenga suficiente temperatura la demanda de calefacción se cubrirá empleando la caldera únicamente. Si por el contrario, en el depósito solar hubiese temperatura suficiente y el tanque de ACS no demanda agua del depósito solar (por ejemplo por estar a mayor temperatura) se podría emplear el agua calentada por el sol para hacer trabajar menos a la caldera de calefacción.

4.4.1 ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN PARA CALEFACCIÓN

Los elementos adicionales que se deben incorporar al sistema principal de producción son:

- Caldera de baja temperatura
- Intercambiador de placas acoplando el depósito solar con el circuito primario de la caldera
- Sistema de regulación

➤ Caldera para calefacción:

El dimensionamiento de la caldera de calefacción se hace en función de la máxima demanda. Se emplea una caldera de condensación de baja temperatura por ser la más indicada para el sistema de suelo radiante.

La caldera seleccionada se encuentra en el capítulo correspondiente en el que se muestran los catálogos de los equipos.

➤ Intercambiador de placas:

Para el dimensionamiento del intercambiador de placas se emplea el mismo mecanismo que para el intercambiador solar y el de ACS. El rango de temperaturas de trabajo será ligeramente diferente en el circuito primario de las calderas, pero el número de placas resultante es el mismo que para el intercambiador de ACS, por lo que se escoge el mismo modelo.

➤ Sistema de regulación:

La instalación de calefacción tiene un funcionamiento independiente de la del ACS, con lo cual se estudia su regulación de forma separada.

En el sistema de control se mide la diferencia de temperaturas entre el acumulador solar y la temperatura de retorno del circuito de calefacción para así regular si se ha de enviar el agua de retorno del circuito de calefacción a ser precalentada por el acumulador solar o ha de enviarla directamente a la caldera.

- Si la $T_{\text{retorno calefacción}} > T_{\text{acum_solar}}$, la centralita regula una válvula de conexión para que el agua de retorno sea enviada directamente a la caldera para que no pierda temperatura. En este caso el funcionamiento sería como el de un circuito convencional sin apoyo solar
- $T_{\text{retorno calefacción}} < T_{\text{acum_solar}}$, la posición de la válvula regulada por la centralita estará de tal forma que el agua será enviada a ser precalentada por el agua del depósito solar mediante el intercambiador de placas, para así, al llegar a la caldera estar a mayor temperatura con el consecuente ahorro que se produce por disminuir el salto térmico entre la impulsión y el retorno. Si la temperatura el agua enviada desde el acumulador fuese suficiente para ser impulsada a los circuitos de calefacción la caldera no tendría que encenderse.

4.5 ESQUEMA GENERAL DE LA INSTALACIÓN DE ACS + CALEFACCIÓN

Por último se muestra un esquema básico de la instalación solar con apoyo al ACS y a la calefacción. Simplemente se han dibujado los elementos más básicos y esenciales, sin tener en cuenta circuitos de recirculación ni válvulas que podrían variar el comportamiento del sistema en un determinado momento en función de la demanda.

Pese a lo básico del esquema si nos sirve para ver claramente la configuración final del diseño adoptado para la instalación en el bloque de viviendas, y la presencia de los 3 circuitos principales: el circuito solar, el circuito de ACS y el circuito de calefacción. Cada circuito tiene un intercambiador asociado para realizar el intercambio de calor entre su circuito primario y su circuito secundario.

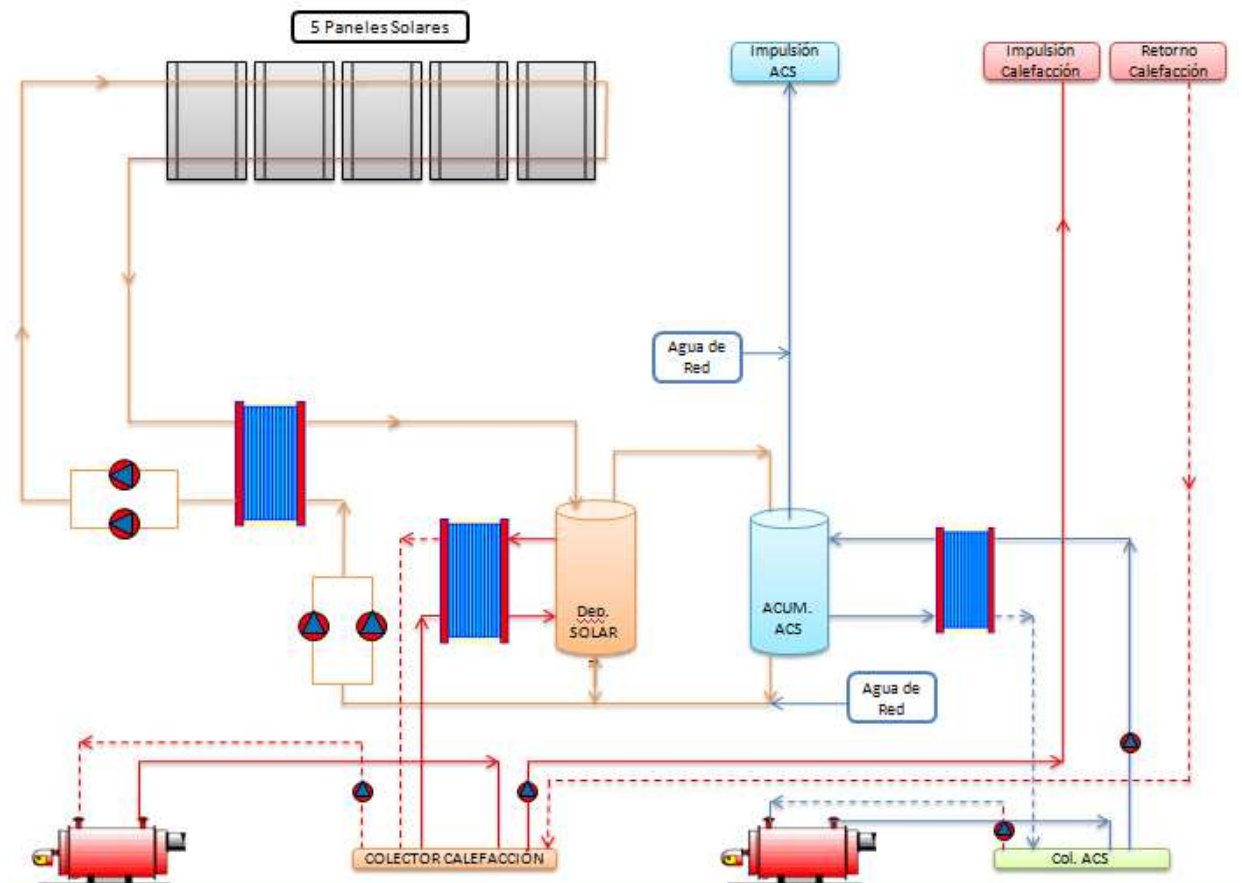
La principal pega de la configuración de este sistema es que no nos permite funcionar con una sola caldera cuando exista demanda simultánea de ACS y calefacción y la contribución solar no fuera suficiente, ya que la única posibilidad para conseguir esto sería funcionar solamente con la caldera de ACS calentando el depósito de ACS y a partir de este calentar el depósito solar para así alcanzar una temperatura suficiente para no encender la caldera de calefacción, pero esta medida no tiene demasiado sentido porque se estaría enfriando el depósito de ACS el cual debe mantenerse a una temperatura constante de 60°C.

Para poder emplear sólo una de las dos calderas de manera eficiente cuando la demanda lo permitiese se debería emplear un único intercambiador de placas común para ACS y calefacción. En el segundo esquema se muestra esta configuración. La desventaja que tiene

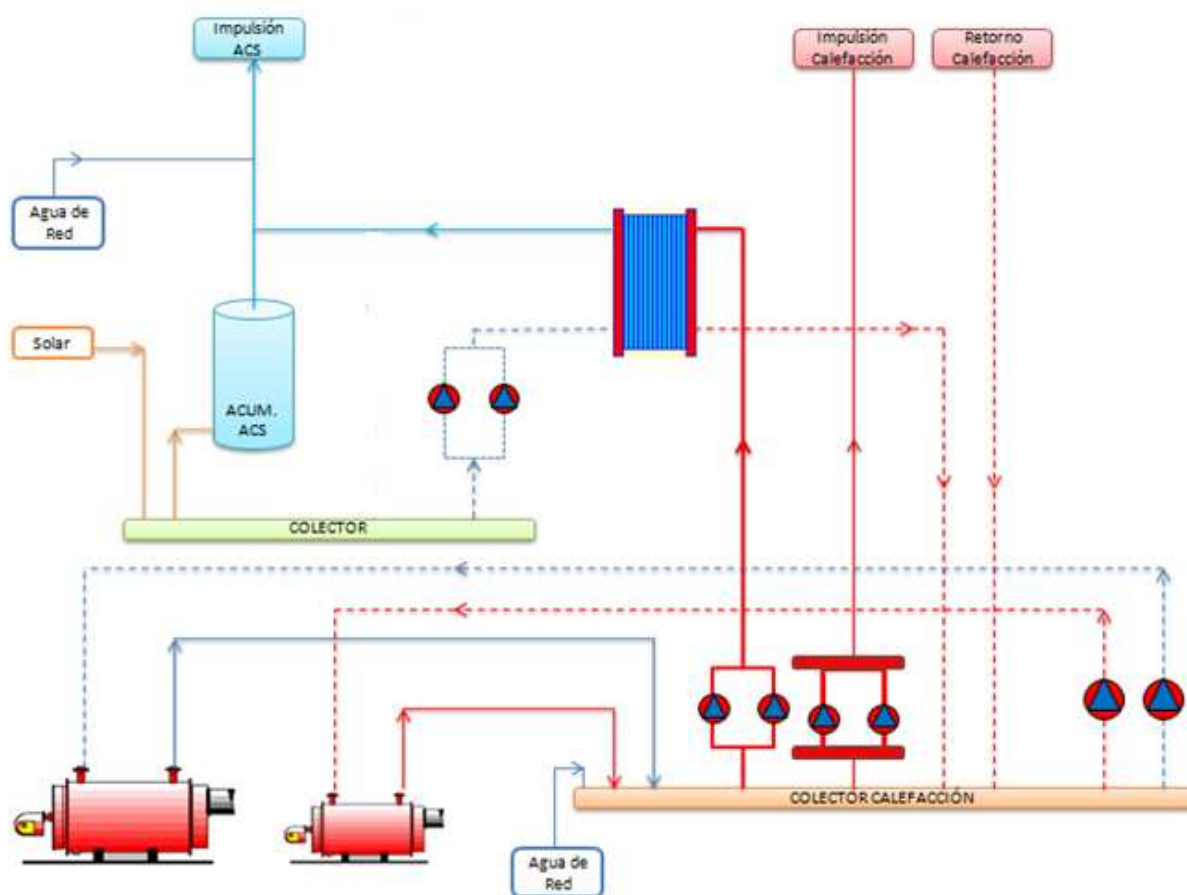
tener esta configuración es que cuando hubiese demanda simultánea de ACS y calefacción la gran diferencia de temperaturas de impulsión requeridas hace que este sistema no sirva para calefacción con suelo radiante. En caso de emplear un sistema de radiadores si sería la mejor opción.

Por todas estas razones se ha optado por el esquema 1 como la configuración final de la instalación solar.

Esquema 1:



Esquema 2: Un único intercambiador de placas común para el apoyo de la caldera de calefacción y de ACS.



5.1 *INTRODUCCIÓN*

En este capítulo se va a hacer un pequeño inciso en la posibilidad de realizar una instalación de climatización aprovechando la instalación solar para dar frío al bloque de viviendas. El frío solar actualmente se puede conseguir con el empleo de una máquina de absorción, la cual necesita el aporte de calor en el generador para poder producir el frío. El gran problema de la aplicación de este tipo de máquinas reside en que para un correcto funcionamiento requiere temperaturas en el generador de al menos 90°C, temperatura que será alcanzada en los paneles solares en muy contadas ocasiones y de forma muy puntual en las horas de máxima radiación de los meses de verano. Por todo ello y por las condiciones climatológicas de la ciudad de Pontevedra no se recomienda el empleo de una máquina de absorción para la producción de frío debido a su alto coste y a su más que posible mal funcionamiento.

Los temperaturas medias de los meses de verano en Pontevedra no son suficientes para que exista una demanda muy elevada de climatización, por lo que en caso de que las viviendas requiriesen un sistema de climatización habría que barajar otras opciones más viables económicamente.

A pesar de que en el presente proyecto se opta por no instalar un sistema de climatización debido a la baja demanda prevista, si se ha querido realizar una propuesta alternativa al empleo de la máquina de absorción para la producción de frío.

El planteamiento considerado se muestra en los siguientes puntos.

Cabe destacar antes de nada, que el estudio que abajo se muestra es simplemente con carácter ilustrativo y docente, no entrando en un análisis exhaustivo pues prácticamente conllevaría la realización de un segundo proyecto.

5.2 *SOLUCIONES ALTERNATIVAS AL FRÍO SOLAR MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES*

5.2.1 *INTRODUCCIÓN*

A pesar de que la demanda de climatización prevista en el bloque de viviendas no es suficiente para amortizar una instalación de climatización, en este proyecto se pretende ofrecer soluciones alternativas a la producción de frío cuando la máquina de absorción no sea la solución más viable ni económica ni energéticamente hablando. Se han barajado por ello otras opciones para dar servicio de climatización al bloque de viviendas.

Siendo el objetivo de este proyecto no sólo la aplicación de la normativa sobre el aprovechamiento solar térmico para ACS si no también la impulsión de las energías renovables en el ámbito residencial, se plantea una solución alternativa a la realizada también basada en energías renovables: la **energía geotérmica** como fuente de energía.

El empleo de la energía geotérmica en el sector residencial como fuente de recursos para satisfacer las demandas de calefacción, ACS y climatización es realizable mediante el empleo de una bomba de calor, empleando el subsuelo como foco para el intercambio de calor gracias a las buenas propiedades térmicas que tiene.

La solución de la bomba de calor además es adecuada para combinarla con el suelo radiante y con la producción de energía solar. La principal modificación que habría que realizar en el sistema hasta este punto diseñado sería la de sustituir la caldera de calefacción por la bomba de calor, manteniendo el intercambiador de placas diseñado para calefacción para acoplar el aporte solar a la bomba de calor. De esta manera en invierno el sistema solar aportaría un calor extra al evaporador y en verano cabría la posibilidad de enviar calor al subsuelo preparando el terreno para la época invernal siguiente. Esta última opción es una alternativa que habría que estudiar con mayor profundidad para analizar las posibilidades térmicas del terreno y la viabilidad económica de dicha solución. El funcionamiento en verano sería similar, únicamente variará la función del suelo radiante, comportándose en verano como un suelo refrescante empleando directamente el diseño ya realizado. Se podría estudiar la posibilidad de diseñar una instalación de techo refrescante, más eficiente que el suelo para dar frío, pero los costes se duplicarían y es preferible emplear el suelo radiante para ambos servicios.

La energía geotérmica se define como la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie terrestre, por tanto tiene su fundamento en el aprovechamiento de la temperatura del subsuelo como foco de temperatura. En función de la temperatura que se alcanza en el subsuelo, se distinguen cuatro tipos de energía geotermia, siendo interesante para las instalaciones de calefacción y climatización la categoría **Fuentes de muy baja temperatura (Temperaturas menores de 30°C)**

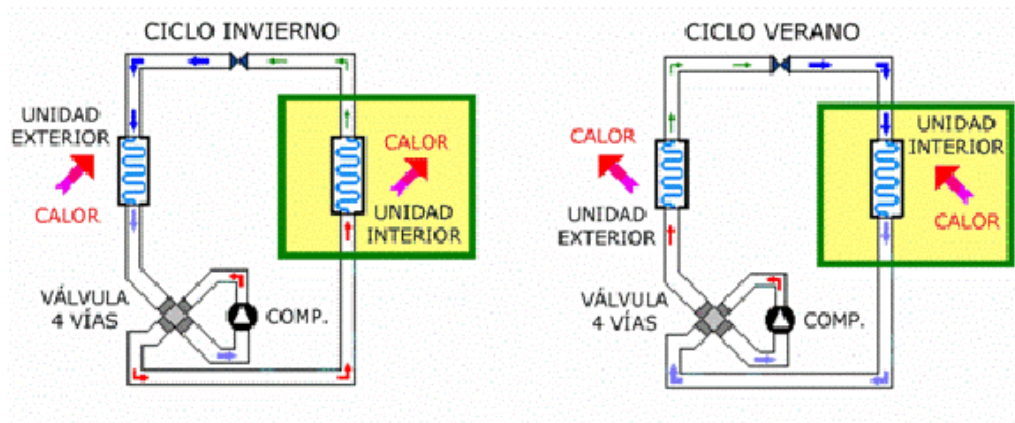
A continuación se exponen los principales aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de estudiar las posibilidades de una instalación geotérmica de muy baja temperatura:

- Capacidad del subsuelo de mantenerse a una temperatura prácticamente constante durante toda la época del año.
- Rendimiento en función de la transmisión de calor del subsuelo, la cual varía mucho en función de variables como: tipo de suelo, profundidad de la excavación, tiempo de intercambio de calor, temperatura de la superficie del suelo, nivel de la capa freática.
- Las temperaturas típicas del subsuelo que se emplean en este tipo de instalaciones oscila entre los 10-18°C siendo como máximo unos 30°C de temperatura alcanzada.

5.2.2 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE LA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA

El funcionamiento de la bomba de calor se basa en las propiedades de los gases, estos se enfrían cuando se expanden y se calientan cuando se comprimen. Este concepto básico es el principio de funcionamiento de la bomba de calor, que consta de un circuito compuesto por un compresor, un evaporador, un condensador y una válvula de expansión, por donde circula el fluido refrigerante el cual se evaporará en el evaporador captando calor y se condensará en el condensador cediendo calor. La circulación del fluido se realiza mediante el compresor y la válvula de expansión que permiten al refrigerante seguir este ciclo. El intercambio de calor se produce con los focos que corresponden al circuito secundario de la instalación, habiendo un circuito secundario en el evaporador y otro en el condensador.

Para no extendernos demasiado en la explicación del funcionamiento de la bomba de calor y de la función de cada componente, se muestra un esquema sencillo del ciclo seguido por el fluido refrigerante.



La válvula de cuatro vías permite invertir el flujo según trabaje la bomba en modo frío o modo calor alternando las funciones del compresor-evaporador. La válvula de expansión tiene que ser de doble sentido.

Los focos con los que intercambiará calor el condensador y el evaporador serán el subsuelo y el suelo radiante/refrescante.

Como ya se ha explicado, la bomba de calor funciona mediante el intercambio de calor en el condensador y en el evaporador con sus respectivos focos. El condensador ceder calor, en invierno lo hará al sistema de calefacción de suelo radiante y en verano lo cederá al subsuelo, mientras que el evaporador en verano absorberá calor del ambiente de las habitaciones a climatizar y en invierno absorberá calor del subsuelo y de los paneles solares.

La **principal ventaja** de las bombas de calor geotérmicas frente a las convencionales, está en la disminución del salto térmico entre el condensador y el evaporador, aumentando de esta forma su eficiencia (COP). En verano una bomba convencional debe ceder calor a la atmósfera cuya temperatura ambiente puede rondar los 30-35°C, por lo que el compresor debe trabajar

más hasta elevar la temperatura del refrigerante hasta unos 50°C, sin embargo, en una bomba de calor la temperatura a la que puede ceder calor es bastante menor, próxima a los 20°C, por lo que el compresor de la máquina tendrá que trabajar menos.

5.2.3 ACOMPLAMIENTO SISTEMA SOLAR CON LA BOMBA DE CALOR

Como se ha expuesto anteriormente, el foco frío de la bomba de calor geotérmica será el subsuelo terrestre. Para la aplicación de calefacción, es posible acoplar la instalación solar diseñada para ACS con la bomba de calor geotérmica, aportando calor al evaporador a mayor temperatura y por ello permitir que la temperatura del evaporador sea mayor (se mantiene el salto térmico entre el evaporador y el circuito secundario de aporte de calor en unos 10°C) evaporador sea mayor con el consiguiente beneficio conseguido en el COP de la bomba.

Además de esto, también cabe la posibilidad de aprovechar el calor sobrante que se produce en los paneles solares en época estival para calentar el terreno y dejarlo en buenas condiciones para el funcionamiento de la bomba de calor para calefacción. Este proceso también puede tener un riesgo ya que puede “agotarse” el terreno y perder capacidad térmica, por ello haría falta un riguroso estudio de las posibilidades térmicas del terreno a estudiar.

5.2.4 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

El intercambio de calor que tiene lugar en el subsuelo se lleva a cabo a través de colectores por los que circula el agua que ha de ser calentada o enfriada según la aplicación. Existen dos tipos de tipologías a la hora de instalar los colectores:

- Captadores horizontales enterrados
- Sondas geotérmicas (vertical)

Los captadores horizontales son una buena solución cuando existe terreno suficiente para su instalación siendo una solución buena para aplicaciones en donde la demanda energética no se muy elevada como en el caso de viviendas unifamiliares o el bloque de viviendas. Estos captadores estarán bajo el suelo a poca profundidad por lo que su coste no es muy elevado. La superficie necesaria para estos captadores será función de las características térmicas del terreno.

La otra solución es el empleo de sondas geotérmicas verticales cuyo coste es algo más elevado pero se convierte en la única solución posible cuando no hay suficiente superficie de terreno disponible o cuando las condiciones térmicas del terreno son mucho más favorables a más metros de profundidad.

La elección que se hará para este proyecto será la de emplear sondas geotérmicas por varias razones:

- La disponibilidad del terreno
- Las mejores propiedades térmicas del terreno a pocos metros de profundidad
- Existencia de capas freáticas bastante superficiales en la ciudad de Pontevedra, mejorando de este modo la capacidad del terreno para la transmisión de calor.

Los captadores de la energía geotérmica intercambian el calor a través de un intercambiador que funciona con los circuitos del subsuelo y el circuito secundario de la unidad exterior de la bomba de calor. El intercambiador tendrá que ser diseñado para la potencia de intercambio requerida por el sistema.

➤ PARÁMETROS DE DISEÑO

Para determinar la longitud de tubo necesario se emplean ratios experimentales sacados de la *Guía de la Energía Geotérmica*:

- Calefacción: 25-40 W/m
- Climatización: 30 W/m

A partir de los datos de demanda térmica de calefacción y climatización se dimensiona las sondas geotérmicas.

Respecto al tipo de tubo que debe utilizarse en el DOCUMENTO ANEXO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA se recomienda emplear tubos de polietileno completamente soldado PEM PN 6.3 – 8.

5.3 REALIZACIÓN DEL PROYECTO DE UNA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA

Para la realización de un proyecto que emplea energía geotérmica se *DOCUMENTO ANEXO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA* en donde se detallan todos los aspectos de carácter técnico y legal que hay que tener en cuenta a la hora de realizar un proyecto de estas características.

No es el objetivo de este proyecto el de realizar una instalación geotérmica con todos los estudios que ello implica ya que supondría la realización de un nuevo proyecto, sino la de fomentar e impulsar las energías renovables como medio para cubrir la demanda térmica de edificios principalmente de carácter residencial, analizando desde una perspectiva económica y energética la solución más viable.

5.3.1 CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA

Para el diseño de la instalación de climatización es necesario calcular la carga térmica máxima que se debe disipar en verano para seleccionar la bomba de calor con una potencia necesaria.

El procedimiento del cálculo de todas las cargas térmicas es similar al empleado en invierno, por lo que no se volverá a detallar todos los pasos que hay que realizar.

Al no dimensionar el área de paneles para climatización, se harán los cálculos teniendo en cuenta la situación más desfavorable de temperatura y por tanto no se analizan las cargas térmicas mes a mes.

Las condiciones de diseño que se han tomado son las siguientes:

- $T_{ext} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; Temperatura máxima con NPE 1% (Se debería emplear un NPE más alto pero para que el estudio de climatización tenga algo de sentido se opta por considerar este)
- $T_{diseño} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$; Temperatura a la cual voy a mantener los locales climatizados.

Los resultados que se obtienen del análisis de todas las cargas térmicas es el siguiente.

BLOQUE 1				Qe (kW)
C.CONDUCCIÓN	C.INTERNA	C.Vent+Inf	C.Latente	
KW	KW	KW	KW	
5,14	3,89	4,56	9,31	22,91

Por tanto es necesario que en el evaporador se disipen alrededor de 23 KW de potencia.

5.3.2 COP DEL SISTEMA

En este punto se procede a calcular la eficiencia que tendrá la bomba de calor en modo frío y en modo calor. El fluido refrigerante empleado es el R 410a.

Las potencias que debe ser capaz de dar la bomba de calor son de 23 KW en verano y de 25 KW en invierno, que serán las potencias que se deban obtener en el evaporador y en el condensador respectivamente.

Condiciones:

$T_{int_v} := 24$ Temperatura interior en verano

$T_{int_i} := 22$ Temperatura interior en invierno

$T_{rocio} := 17.5$ Temperatura de rocío se calcula a partir del diagrama psicrométrico para una humedad relativa media en los meses de verano del 66% en Pontevedra.

$T_{suelo_v} := 15$ Temperatura del suelo en verano y en invierno.

$T_{suelo_i} := 13$

Las temperaturas del suelo son hipotéticas, se ha escogido dicho valor por encontrarse dentro del rango típico de instalaciones geotérmicas de muy baja temperatura para usos domésticos. Evidentemente si se fuese a ejecutar el proyecto, habría que analizar las posibilidades térmicas del suelo de forma detallada.

➤ BOMBA DE CALOR MODO FRÍO

Las temperaturas de impulsión y retorno del suelo refrescante son las siguientes;

Nota: Para evitar posibles condensaciones del aire que está en contacto con el agua fría se impone como temperatura de consigna para el sistema de regulación una temperatura ligeramente mayor a la temperatura de rocío calculada.

$$T_{\text{imp_v}} := T_{\text{rocío}} + 1.5 = 19$$

$$T_{\text{ret_v}} := T_{\text{imp_v}} + 5 = 24$$

Defino las temperaturas de los focos:

Los intercambiadores de placas que representan al condensador y al evaporador trabajan con sistemas agua-agua. El circuito secundario del componente del subsuelo será agua que ha intercambiado previamente calor con el intercambiador que se instala en el subsuelo para extraer o ceder calor según el caso.

CONDENSADOR:

$$T_{\text{agua_condensador_v}} := T_{\text{suelo_v}} + 10 = 25 \quad \text{Circuito secundario del condensador.}$$

$$T_{\text{cond_v}} := T_{\text{agua_condensador_v}} + 10 = 35 \quad \text{Circuito primario del condensador.}$$

$$P_{\text{cond_v}} := 22 \quad [\text{bar}] \quad \text{El condensador cede calor al intercambiador de placas del subsuelo.}$$

EVAPORADOR:

$$T_{\text{agua_interior_v}} := T_{\text{imp_v}} - 10 = 9 \quad \text{Circuito secundario del evaporador.}$$

$$T_{\text{evap_v}} := T_{\text{agua_interior_v}} - 7 = 2 \quad \text{Circuito primario del evaporador.}$$

$$P_{\text{evap_v}} := 8.5 \quad [\text{bar}] \quad \text{El evaporador absorbe calor de la vivienda.}$$

Datos del ciclo del refrigerante R-410a:

$$h_{2_v} := 250 \quad h_{1_v} := h_{2_v} = 250 \quad h_{3_v} := 430 \quad h_{4_v} := 450$$

Evaporador: $q_{e_v} := h_{3_v} - h_{2_v} = 180$

Condensador: $q_{c_v} := h_{4_v} - h_{1_v} = 200$

Compresor: $w_{c_v} := \frac{(h_{4_v} - h_{3_v})}{\eta_t} = 37.037$

$$CEE_f := \frac{q_{e_v}}{w_{c_v}} = 4.86$$

El valor del COP obtenido es bastante elevado, hay que tener en cuenta el consumo eléctrico del bombeo de agua. Aún así, al trabajar con un salto térmico entre el evaporador y el condensador pequeño se consigue un funcionamiento muy bueno en la bomba de calor en modo frío, obteniéndose un COP mayor que en las bombas de calor que trabajan con sistemas aire-agua.

➤ BOMBA DE CALOR MODO CALOR

El funcionamiento de la bomba de calor en invierno será el que sigue: En invierno el intercambio de calor se produce entre el subsuelo (15°C aprox.) que actúa como evaporador del refrigerante, y el suelo radiante, que condensa al refrigerante. La bomba de calor se pondrá en marcha sólo cuando el aporte solar sea insuficiente.

En los cálculos que se muestran a continuación no se tiene en cuenta la contribución solar.

Las temperaturas de impulsión y retorno del suelo radiante son las siguientes;

$$T_{imp_i} := 45$$

$$T_{ret_i} := T_{imp_i} - 10 = 30$$

Defino las temperaturas de los focos:

$$T_{cond_i} := T_{imp_i} + 5 = 50 \quad P_{cond_i} := 30 \quad \text{El condensador cede calor a la vivienda.}$$

$$T_{agua_condensación_i} := T_{suelo_i} - 8 = 5 \quad \text{Circuito secundario del evaporador.}$$

$$T_{evap_i} := T_{agua_condensación_i} - 10 = -5 \quad \text{Circuito primario del evaporador.}$$

$$P_{evap_i} := 7 \quad \text{El evaporador absorbe el calor del subsuelo.}$$

Datos del ciclo del refrigerante:

$$h_{2_i} := 290 \quad h_{1_i} := h_{2_i} = 290 \quad h_{3_i} := 420 \quad h_{4_i} := 465$$

Evaporador: $q_{e_i} := h_{3_i} - h_{2_i} = 130$

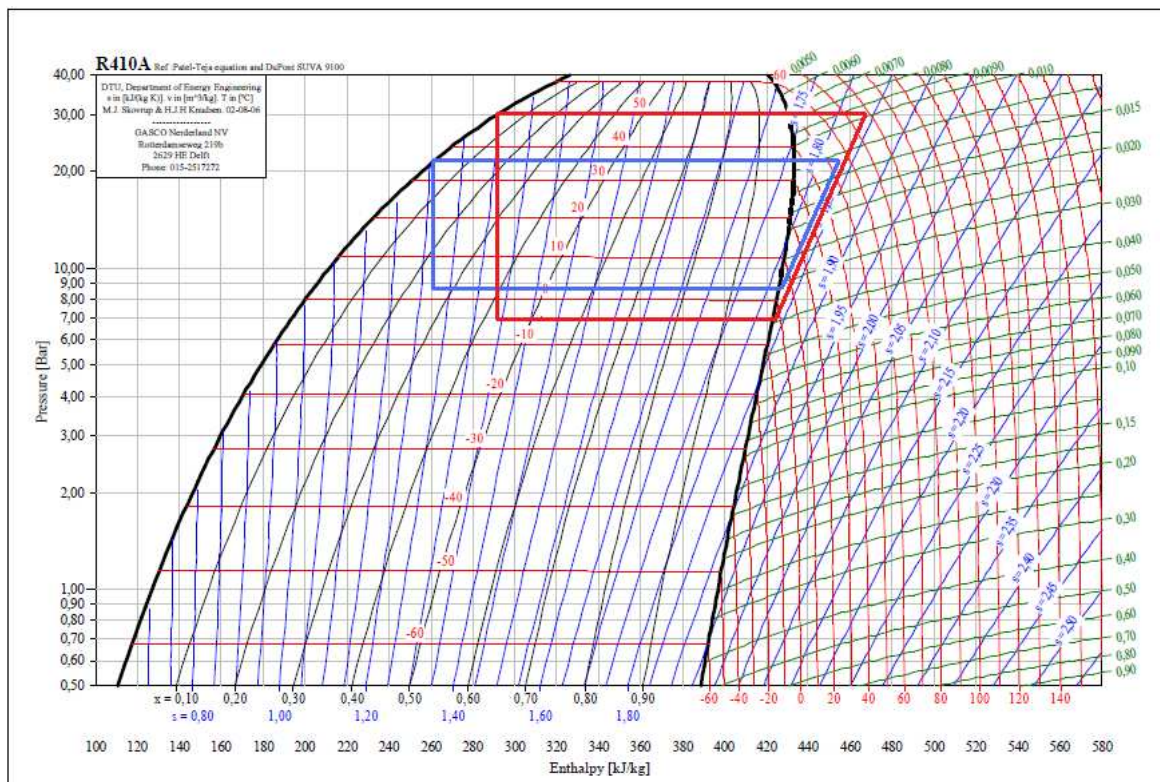
Condensador: $q_{c_i} := h_{4_i} - h_{1_i} = 175$

Compresor: $w_{c_i} := \frac{h_{4_i} - h_{3_i}}{\eta_t} = 83.333$

$COP_c := \frac{q_{c_i}}{w_{c_i}} = 2.1$ Eficiencia en modo calor mayor que en el caso de bombas de calor de aire-agua.

Evidentemente los valores obtenidos del COP son sólo estimaciones y nos sirve de forma orientativa para evaluar el mejor comportamiento de la bomba de calor geotérmica ante las convencionales.

El diagrama del refrigerante se muestra en el siguiente esquema, representándose en él el funcionamiento en modo calor y modo frío.



El diagrama en rojo corresponde al diagrama que sigue el refrigerante cuando la bomba actúa en modo calor y el dibujado en azul corresponde al modo frío.

La mayor ventaja del sistema geotérmico reside en el elevado COP que se alcanza en comparación con las bombas de calor aire-agua convencionales que se emplean en viviendas.

Con estos mismos datos se ha realizado una comparación del COP que alcanzaría una bomba de calor aire-agua, mostrándose los resultados en el siguiente cuadro resumen:

	Temperatura de evaporación		Temperatura de condensación		COP	
	Calor	Frío	Calor	Frío	Calor	Frío
Equipo Aire Agua	-9	2	50	55	2,5	1,9
Equipo Geotérmico	-5	2	50	35	3,4	4,7

Por tanto, la menor diferencia entre los focos de intercambio de calor hace que el COP del equipo geotérmico sea bastante mayor que en el otro equipo para demandas térmicas iguales.

La temperatura de evaporación en el equipo geotérmico de -5°C puede estar incluso sobredimensionada, siendo apta una temperatura de unos 5°C

5.4 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos del estudio de climatización se concluye que la opción de una bomba de calor geotérmica puede ser la mejor solución en instalaciones domésticas frente a otras soluciones como la máquina de absorción. Es evidente que el estudio realizado en este proyecto es muy básico y si se quisiera llevar a cabo un proyecto que emplease energía geotérmica sería necesaria una mayor dedicación para determinar con mayor exactitud las posibilidades reales de implantar este sistema.

Cabe mencionar un aspecto que no se ha tenido demasiado en cuenta como es el intercambiador de calor que se instala en el subsuelo para realizar el intercambio entre el sistema geotérmico y la unidad exterior de la bomba de calor. El buen diseño y funcionamiento de este intercambiador es indispensable para el correcto funcionamiento del sistema y actualmente hay programas de cálculo gratuitos que en función de parámetros de demanda térmica, composición del suelo pueden dimensionar el intercambiador de una forma eficaz para instalaciones domésticas.

CAPÍTULO 6: PRESUPUESTO DE LA INSTALACIÓN

Una vez calculados los parámetros de la instalación se procede a elaborar el presupuesto teniendo en cuenta todos los costes que tienen los elementos diseñados. Se ha buscado para ello información en catálogos de las principales casas distribuidoras de equipos para instalaciones solares.

El presupuesto final de la instalación se muestra a continuación en la siguiente tabla en donde se detalla el número de elementos escogido de cada equipo, el coste unitario y el total.

PRODUCCIÓN DE CALOR			10.984,80
CALDERA + QUEMADOR 35 kw	1,00	2.284,80	2.284,80
Caldera de gas para ACS con quemador modulante, marca VIESSMANN, modelo Vitogas 200 F de 35 KW de potencia útil. Incluye quemador de premezcla. Dimensiones totales - Altura: 890 mm - Anchura: 760 mm - Profundidad: 780 mm			
CALDERA + QUEMADOR 48,4 kw	1,00	2.500,00	2.500,00
Caldera de baja temperatura a gas para calefacción, marca FERSYSTEM 50, con una Potencia de 48,4kW. Incluye quemador modulante y certificado de emisiones de NOx. Dimensiones totales - Altura: 720 mm - Anchura: 630 mm - Profundidad: 280 mm			
INTERCAMBIADOR DE PLACAS PARA ACS	2,00	1.200,00	2.400,00
Intercambiador marca Viessmann, modelo Vitotrans para calentamiento de ACS, con 27 placas de acero inox. - Potencia 19 kW - C.Primario - Temperatura 70/50°C - Caudal 270 l/h. - C.Secundario - Temperatura 40/45°C - Caudal 300 l/h.			
COLECTOR IMP/RET	2,00	550,00	1.100,00
Colector de impulsión/retorno para circuito de distribución de calefacción y de ACS. Incluidas todas las tomas necesarias para conexión de los circuitos, llenado y vaciado			

DEPÓSITO ACUMULADOR A.C.S. 750 litros.	1,00	850,00	850,00
Depósito de A.C.S. de la casa Ibersolar, aislado con espuma rígida de poliuretano de alta densidad, de las siguientes características: - Capacidad: 750 l. - Presión máx: 6 bar - Temp máx: 95°C			
BOMBAS CIRCULADORAS	2,00	400,00	800,00
Bomba GRUNDFOS, modelo UPSD 32-80 B I-230 50 Hz, para circulación de agua. presión máxima de 10 bar.			
BOMBAS IMPULSIÓN ACS	1,00	650,00	650,00
Bombas Grundfos UPS 100 para circuito primario de calderas, con motor monofásico de tres velocidades, presión máxima de 10 bar. -Modelo: UPS 32-120F -Potencia: 0,4 KW			
ENERGIA SOLAR			10.556,83
COLECTORES SOLARES	5,00	700,00	3.500,00
5 colectores solares de la marca GEO-TEC SOLARTECHNIK modelo GSE 2000/TIN con las siguientes características técnicas: - Superficie de absorción: 1,86 m2 - Caudal nominal: 100 l/h - Temperatura estancamiento: 209°C			
INTERCAMBIADOR DE PLACAS SOLAR	1,00	1.156,83	1.156,83
Intercambiador marca Viessmann, modelo Vitotrans 486 para intercambio solar, con 51 placas de acero inox. - Potencia 25 kW - C.Primario - Temperatura 70/50°C - Caudal 420 l/h. - C.Secundario - Temperatura 40/45°C - Caudal 450 l/h.			
VASO DE EXPANSIÓN CERRADO DE MEMBRANA DE 6 L	1,00	400,00	400,00
Suministro e instalación de vaso de expansión cerrado modelo 140 CMF con una capacidad de 140 L compuesto de los siguientes elementos: - Presión máxima de utilización de 6 bar. - Temperatura máx.de funcionamiento -10°C/+100°C.			

BOMBAS PRIMARIO SOLAR	1,00	650,00	650,00
Bombas Grundfos UPS 100 para circuito primario solar, con motor monofásico de tres velocidades, presión máxima de 10 bar. -Modelo: UPS 32-120F -Potencia: 0,4 KW			
DEPÓSITO ACUMULADOR SOLAR 750 litros.	1,00	850,00	850,00
Depósito Solar de la casa Ibersolar, aislado con espuma rígida de poliuretano de alta densidad, de las siguientes características: - Capacidad: 750 l. - Presión máx: 6 bar - Temp máx: 95°C			
RED DE TUBERÍAS	1,00	4.000,00	4.000,00
Suministro y montaje de red general de distribución de energía solar desde colectores solares hasta intercambiadores de placas, realizada en tubo de cobre en todo su trazado.			
SUELO RADIANTE			17.900,00
SUELO RADIANTE	1,00	16.500,00	16.500,00
Calefacción por suelo radiante sistema Uponor, con agua a baja temperatura, circulando en circuito cerrado por tuberías de polietileno reticulado Uponor Wirsbo-evalPEX 20x 2.0, sobre panel portatubos Uponor con aislante de poliestireno de 11 mm. de espesor. Incluye Kit completo de colectores (provisto de colector de ida, colector de retorno, detentores, purgadores automáticos, válvulas de paso, termómetros, llaves de llenado y vaciado)			
BOMBA SUELO RADIANTE	2,00	700,00	1.400,00
Bomba GRUNDFOS, modelo MAGNA, de imán permanente, presión máxima de 10 bar.			
SISTEMA DE CONTROL	1,00	10.000,00	10.000,00
Sistema de gestión centralizada, marca TREND, compuesto por puesto central de gestión, controladores y módulos necesarios, sondas de temperatura, presostatos, vainas, valvulas de control, actuadores de valvulas y compuertas, programación y puesta en marcha.			
Total BLOQUE DE VIVIENDAS			49.441,63 €

Como se puede apreciar, el coste asciende a casi 50 K€, teniendo en cuenta que se está considerando el total de las instalaciones. Además hay que destacar que en este precio se incluye un sistema de telegestión, el cual sólo tendría sentido aplicarlo cuando exista una empresa que gestionase y explotase la instalación. Esta opción es la que se recomienda en este proyecto, ya que la existencia de una empresa gestiona y garantiza el correcto

funcionamiento de la instalación, y es la mejor opción para explotar los recursos de la misma, ya que a fin de cuentas, de poco sirve realizar una instalación sin que después haya un seguimiento.

Realmente para un solo bloque de viviendas la inversión de toda la instalación es bastante elevada, siendo amortizable en demasiados años. El diseño que se ha realizado es el más óptimo para instalaciones que cubran la demanda de un mayor número de viviendas pues el incremento de coste no sería muy considerable y el precio sería a pagar entre más usuarios.

Cuando el número de viviendas es pequeño y por tanto la demanda de ACS va a ser baja, se pueden optar por otras soluciones que disminuyan el coste de la instalación, por ejemplo empleando colectores solares con el tanque de almacenamiento incorporado, independientes para cada chalet y emplear la caldera de apoyo en serie con este para trabajar menos cuando fuese posible por la contribución solar.

CAPÍTULO 7: ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL

En este capítulo se va hacer un breve estudio de la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera gracias a la contribución solar a la producción de energía térmica, disminuyendo por ello el consumo de combustible fósil en las calderas.

La generación de energía útil solar permite que las calderas de ACS y calefacción puedan demandar una cantidad menor de combustible, ya que parte de la energía que necesitan para elevar la temperatura del fluido se aporta de forma gratuita con el sistema solar. El cálculo de emisiones se realizará a partir de unos coeficientes de equivalencia de los recursos empleados que relacionan la energía eléctrica consumida en kwh con la producción de contaminantes en kg de CO₂

El coeficiente que se emplea es el correspondiente al gas natural pues se han elegido dos calderas que emplean este combustible, pues es mucho más económico que el gasóleo.

$$\text{Coeficiente de emisiones G.N} = 0,204 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kwh}}$$

El ahorro se calculará teniendo en cuenta el combustible que se deja de consumir por la contribución solar. Este ahorro de cantidad de CO₂ se calculará a partir de la energía útil que se aprovecha del Sol y aplicando un rendimiento en la caldera de 0,9 resultado de la transformación del combustible en energía térmica.

Los resultados que se obtienen se muestran en la siguiente tabla.

	f_acs	Q_ACS (kwh)	Q_solar (kwh)	Ahorro kwh	Kg CO2
Enero	0,12	3071,0	368,5	409,47	83,5
Febrero	0,18	2720,5	489,7	544,09	111,0
Marzo	0,34	2448,6	832,5	925,03	188,7
Abril	0,43	2066,3	888,5	987,22	201,4
Mayo	0,46	2089,7	961,3	1068,09	217,9
Junio	0,73	1384,9	1010,9	1123,27	229,1
Julio	1	999,4	999,4	1110,49	226,5
Agosto	0,97	1022,2	991,5	1101,65	224,7
Septiembre	0,48	2022,3	970,7	1078,57	220,0
Octubre	0,39	2135,2	832,7	925,24	188,7
Noviembre	0,18	2800,5	504,1	560,09	114,3
Diciembre	0,13	3071,0	399,2	443,59	90,5

El ahorro total que se consigue es de 2096 Kg de CO₂ en un solo año de funcionamiento, siempre y cuando la instalación funcione bien y haya un correcto seguimiento del comportamiento de la instalación.

También se calcula la cantidad de gas natural que ahorran las calderas empleando para ello su valor del poder calorífico superior (PCS=10,8 m³/kwh)

$$m^3 \text{ de G.N ahorrado} = \frac{AHORRO}{PCS \left(\frac{m^3}{kwh} \right)} = 952 \text{ m}^3 / \text{año}$$

Lo que equivale a un ahorro económico cercano a 415 € al año al precio actual del gas natural (43,69 c€/m³) para el conjunto de consumidores.

Teniendo en cuenta el coste de los elementos de la instalación que pertenecen solamente a la instalación solar se estima que la amortización de la instalación solar será de alrededor de 24 años siempre y cuando funcione correctamente y no haya que hacer reposiciones importantes de aparatos con alto coste.

Este plazo de amortización se calcula teniendo en cuenta el coste total de la instalación solar (en el capítulo de presupuesto viene detallado los componentes escogidos) y el ahorro anual de combustible que supone el aporte solar.

$$Amortización = \frac{Presupuesto_Solar}{Ahorro/anual} = \frac{10 \text{ k€}}{415 \text{ €/año}} = 24 \text{ años}$$

La realización del presente proyecto tenía como objetivo principal la de desarrollar una instalación solar para satisfacer la demanda de ACS y calefacción de la forma más eficiente posible teniendo en cuenta tanto la energía solar aprovechable del Sol y la viabilidad económica del proyecto.

Además del diseño de la instalación se ha querido analizar de forma detallada los principales aspectos de funcionamiento de la instalación para buscar con ello la mejor respuesta posible de la instalación ante la demanda energética y el aprovechamiento solar máximo posible, haciendo hincapié principalmente en el comportamiento del colector solar mediante el cálculo detallado de las pérdidas de calor y en la importancia del seguimiento de la instalación solar una vez se ponga en marcha.

La edificación de estudio estaba formada por 4 bloques de 7 chalets cada uno. Se barajaron varias posibilidades para satisfacer la demanda del conjunto, entre ellas realizar una red de calor para la distribución de la energía producida en una única sala de calderas central, pero debido al alto coste que conllevaría la construcción de una red de calor para tan pocas viviendas hizo que desechásemos la idea. Finalmente se optó por tratar los bloques de forma independiente y realizar el proyecto en un solo bloque de 7 viviendas para posteriormente aplicar el mismo proyecto al resto de bloques.

El emplazamiento de la edificación se encuentra en la ciudad de Pontevedra, en donde las condiciones climatológicas no son las más favorables para la producción solar, sin embargo la exigencia actual del empleo de recursos renovables debido a la escasez de energía fósil y la exigencia medioambiental de reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera hace que las instalaciones solares sean también una solución para zonas geográficas donde la radiación solar no es tan elevada.

El dimensionamiento de la instalación solar se realizó para cubrir la mínima exigencia impuesta por el RITE para la ciudad de Pontevedra perteneciente a la zona climática que requiere una contribución solar de al menos un 30%, siendo de un total de 5 colectores suficientes para cubrir dicho porcentaje de energía empleada para la producción de ACS en un bloque de viviendas.

Se estudió la posibilidad de ampliar el campo de colectores para dar mejor servicio tanto de ACS como de calefacción, pero finalmente se optó por no añadir más paneles solares y buscar cubrir la demanda de calor en función de la configuración de la instalación para acoplar el aprovechamiento solar a los sistemas de producción de ACS y calefacción.

Otro aspecto destacable del proyecto ha sido el estudio que se ha realizado al colector solar como elemento principal para la captación solar, analizando detalladamente todos los efectos de transferencia de calor que se producen cuando está en funcionamiento para poder estimar

las pérdidas de calor de una manera más eficiente que la aplicación directa de la curva de normalización del panel.

El impulso de las energías renovables para aplicaciones domésticas ha llevado a incluir en este proyecto una mención a una energía renovable prácticamente desconocida en España como es la energía geotérmica. Sin hacer un estudio muy profundo de ella por la gran dedicación que ello supondría y porque tampoco era el objetivo principal del proyecto, si se han resaltado las posibilidades que tiene esta energía mediante el empleo de una bomba de calor.

Por último lugar se realizó la valoración económica del proyecto, obteniendo un resultado de una amortización bastante elevada del proyecto, aproximadamente 20 años. A pesar de ello, se ha incidido en varias ocasiones a lo largo del documento en la posibilidad de contratar una empresa gestidora que pueda asumir parte de la financiación del proyecto y se encargue del seguimiento de la instalación para garantizar su correcto funcionamiento, pudiendo de esta forma explotar al máximo la instalación para los cuatro bloques de viviendas y consiguiendo una mayor rentabilidad que la aquí estimada.

REFERENCIAS:

- 1.- *Artículo: Transferencia de calor en colectores solares planos considerando velocidad y dirección del viento. UC3M. Autor: M.C Rodríguez*
- 2.- *CTE. Código técnico de la edificación.*
- 3.- *CENSOLAR*
- 4.- *Pliego de Condiciones Técnicas para Instalaciones de Baja Temperatura.*
- 5.- *Libro de texto “Fundamentos de Transferencia de Calor. Autor: Frank Incropera”*
- 6.- *Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT)*
- 7.- *Manual Técnico de calefacción por suelo radiante de Wirsbo-Evalpex.*

BIBLIOGRAFÍA:

- 1.- *REFERENCIAS*
2. *Tecnología Solar. Autor M. IBAÑEZ PLANA. Ed: MP*
- 3.- *Guía y Anexo de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid*
- 4.- *Introducción y aspectos generales de las bombas de calor geotérmicas. Autor: Doctor Javier F. catedrático de la universidad de Valencia. Publicado en ATECYR*
- 5.- *DTIE 1.01: Preparación de agua caliente para usos sanitarios. Ed: Atecyr*
- 6.- *Manual técnico Suelo radiante refrescante. Saunier Duval*
- 7.- *Curso de Proyectista en Instalaciones de Energía Solar de Baja Temperatura. Autor: Colegio oficial de Ingenieros industriales de Madrid*
- 8.- *Apuntes de las asignaturas: Calor y Frío, Energías Renovables, Ingeniería Térmica y de Fluidos, Tecnología del Frío.*
- 9.- *Páginas web: www.solarenergy.ch; www.genera.ifema.es; www.ingelco.es; www.asit-solar.com; www.grundfos.es; www.ciatesa.com*

ANEXOS: HOJAS DE CÁLCULO APLICADAS

En este punto se muestran las hojas de cálculo aplicadas para la resolución de los sistemas de ecuaciones resultantes, mediante la aplicación de métodos iterativos.

1. SOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES CON DATOS ANUALES EVALUANDO POSTERIORMENTE LAS PÉRDIDAS DE CALOR MEDIANTE LA APLICACIÓN DE CIRCUITOS TÉRMICOS

$A_0 := 9.34$ Empiezo con este valor que es el que me da el método de F-Chart.

$S_c := 1.868$

$N_{\text{paneles}} := 5$

$E_t := 0.25$ $\varepsilon_{IC} := 0.6$ $f := 0.3$

ECUACIONES A RESOLVER:

$$T_{\text{cons}} := f \cdot (T_{\text{sum}} - T_{\text{red}}) + T_{\text{red}} = 299.575$$

Given

$$I_{\text{Tanual}} \cdot \eta_0 \cdot A_0 - Q_{\text{pc}} - [m_1 \cdot C_p \cdot (T_{\text{sco}} - T_{\text{eco}})] = 0$$

$$m_1 \cdot C_p \cdot (T_{\text{sco}} - T_{\text{eco}}) = m_2 \cdot C_p \cdot (T_{\text{ico}} - T_{\text{ici}})$$

$$\frac{(T_{\text{ico}} - T_{\text{ici}})}{(T_{\text{sco}} - T_{\text{ici}})} = \varepsilon_{IC}$$

$$m_2 \cdot C_p \cdot (T_{\text{ico}} - T_{\text{ici}}) = m_{\text{cons}} \cdot C_p \cdot (T_{\text{cons}} - T_{\text{red}})$$

$$T_t = \frac{T_{\text{ico}} \cdot m_2 + T_{\text{red}} \cdot m_{\text{cons}}}{m_2 + m_{\text{cons}}}$$

$$\frac{T_{\text{cons}} - T_t}{T_{\text{ico}} - T_t} = E_t$$

$$\text{Find}(T_{\text{sco}}, T_{\text{eco}}, T_{\text{ico}}, T_{\text{ici}}, T_t, Q_{\text{pc}}) \rightarrow \begin{pmatrix} 305.10998052850728385 \\ 301.06149454719887234 \\ 302.41098987430167618 \\ 298.36250389299326466 \\ 298.62967004189944127 \\ 4.033249467333333812e7 \end{pmatrix} \quad \text{Datos en Kelvin y Julios.}$$

Las pérdidas son las totales que se tienen en un año entero

COMPARO LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS QUE SALDRÍAN APLICANDO LOS CÁLCULOS REALIZADOS CON RESISTENCIAS TÉRMICAS.

Calor útil de la iteración 0

$$Q'_{\text{util}} := m_1 \cdot C_p \cdot (T_{\text{sco}_0} - T_{\text{eco}_0})$$

Temperaturas del agua y de la placa absorbadora.

$$T_{\text{agua}_0} := \frac{T_{\text{eco}_0} + T_{\text{sco}_0}}{2} = 303.086 \quad T_{\text{placa}_0} := T_{\text{sco}_0} + 4.5 = 309.61$$

CÁLCULO DEL CALOR ÚTIL QUE SE TENDRÍA CON LA EXPRESIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RESISTENCIAS TÉRMICAS:

$$\text{Req1} := 0.01429$$

Given

$$Q_{\text{util_c.termico}} = \frac{\Delta T_{\text{placa.agua}}}{\text{Req1}} \cdot N_{\text{paneles}}$$

a) $\text{Find}(\Delta T_{\text{placa.agua}}) \rightarrow 6.72390095214947200$ Salto de temperaturas que se requiere para obtener una $f=0,3$

b) $T_{\text{placa}_0} - T_{\text{agua}_0} = 6.524$ Salto de temperaturas real que tengo, no consigo el calor útil necesario para una fracción solar del 30%.

La solución convergerá cuando la diferencia entre a) y b) tienda a cero. Es necesario aumentar el número de colectores.

Calor útil real:

$$\Delta T_{\text{placa.agua}_0} := T_{\text{placa}_0} - T_{\text{agua}_0} = 6.524$$

$$Q_{\text{util_Res}} := \frac{\Delta T_{\text{placa.agua}_0}}{\text{Req1}} \cdot N_{\text{paneles}} = 2.284 \times 10^3$$

Busco una nueva solución, para ello variaré el número de paneles para conseguir un Qutil con el que consiga una fracción solar de 0.3.

$$Q_{\text{util}} = 2.354 \times 10^3 \quad N_{\text{paneles}} = 5$$

$$Q_{\text{util_Res}} = 2.284 \times 10^3$$

Given

$$Q_{\text{util}} = \frac{Q_{\text{util_Res}} \cdot N_{\text{paneles_1}}}{N_{\text{paneles}}}$$

$$\text{Find}(N_{\text{paneles_1}}) \rightarrow 5.15301235850763051$$

$$N_{\text{paneles_1}} := 6$$

ITERO EL NÚMERO DE VECES QUE HAGA FALTA HASTA QUE LA SOLUCIÓN CONVERJA

2. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA FRACCIÓN SOLAR DE CALEFACCIÓN

DATOS DEL COLECTOR:

$$n_{\text{paneles}} := 5 \quad S_{1c} := 1.868 \quad A_{\text{total}} := n_{\text{paneles}} \cdot S_{1c} = 9.34 \quad [\text{m}^2]$$

$$Q_{\text{nom}} := 100 \cdot n_{\text{paneles}} = 500 \quad [\text{l/h}] \quad \text{Caudal nominal del un panel.}$$

$$m_1 := \frac{100}{3600} = 0.028 \quad m_{1m} := m_1 \cdot n_{\text{paneles}} = 0.139$$

$$m_{2m} := m_{1m} \quad \text{Datos en kg/s}$$

DATOS DE LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN:

$$m_{\text{calef}} := (0.662 \ 0.6 \ 0.496 \ 0.351 \ 0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.243 \ 0.442 \ 0.605)$$

Demanda total de calefacción por parte de un bloque entero de viviendas.

Temperaturas:

$$T_{\text{imp}} := 273 + (39.5 \ 38.1 \ 37.4 \ 35.3 \ 32.7 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 33.2 \ 35.7 \ 38.2)$$

$$T_{\text{ret}} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	302.5	301.1	300.4	298.3	295.7	273	273	273	...

RESOLUCIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN

Pérdidas de calor en los componentes:

$$Q_{\text{circ_térmico}} := (67.9 \ 164.1 \ 307.6 \ 309.4 \ 376.1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 324.4 \ 97.2 \ 133.9)$$

pérdidas del colector calculadas para 1 solo colector en W.

$$Q_{\text{p.tanque}} := (12.4 \ 19.28 \ 38.38 \ 43.03 \ 40.8 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 40.2 \ 17.1 \ 12.82)$$

$$Q_{\text{p.cond.ext_ida}} := (0.77 \ 1.05 \ 1.59 \ 1.65 \ 1.72 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1.57 \ 1.09 \ 0.9)$$

$$Q_{\text{p.cond.ext_ret}} := (1.238 \ 2.324 \ 4.832 \ 5.914 \ 5.907 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 4.971 \ 2.113 \ 1.138)$$

$$Q_{\text{p.cond.int_ida}} := (1.53 \ 2.35 \ 5.71 \ 6.95 \ 7.03 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 5.84 \ 2.16 \ 1.56)$$

$$Q_{\text{p.cond.int_ret}} := (0.648 \ 1.2016 \ 3.9549 \ 5.1418 \ 5.1350 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 4.1071 \ 0.9693 \ 0.5746)$$

COLECTOR:

$$\overrightarrow{[m_{lm} \cdot C_p \cdot (T_{sco} - T_{sco,p})]} = \overrightarrow{(Q_{p.cond.ext_ida} + Q_{p.cond.int_ida})}$$

$$\overrightarrow{[m_{lm} \cdot C_p \cdot (T_{eco,p} - T_{eco})]} = \overrightarrow{(Q_{p.cond.ext_ret} + Q_{p.cond.int_ret})}$$

$$\overrightarrow{[m_{lm} \cdot C_p \cdot (T_{sco} - T_{eco})]} = \overrightarrow{(I_t \cdot A_{total} \cdot \eta_0)} - \overrightarrow{(n_{paneles} \cdot Q_{circ_térmico})}$$

$$\Delta T_{col} := \frac{\overrightarrow{(I_t \cdot A_{total} \cdot \eta_0)} - \overrightarrow{(n_{paneles} \cdot Q_{circ_térmico})}}{m_{lm} \cdot C_p} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	2.624	2.59	3.252	3.52	3.213	0	0	0	0	3.112	3.422	2.472

INTERCAMBIADOR:

$$\overrightarrow{[m_{lm} \cdot C_p \cdot (T_{sco,p} - T_{eco,p})]} = \overrightarrow{[m_{2m} \cdot C_p \cdot (T_{ico} - T_{ici})]}$$

$$\Delta T_{col,p} := \Delta T_{col} - \Delta T_{sco,p} - \Delta T_{eco,p} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	2.617	2.578	3.225	3.486	3.179	0	0	0	0	3.084	3.411	2.465

$$f_{cal} := \frac{\overrightarrow{m_{lm} \cdot \Delta T_{col,p}}}{m_{calef} \cdot (T_{imp} - T_{ret})} =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.055	0.06	0.09	0.138	0.221	0	0	0	0	0.176	0.107	0.057

CATÁLOGOS TÉCNICOS:
